



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Máster

Evaluación de metodologías para la detección remota de derrumbes en bancales abandonados

Evaluation of methodologies for remote detection of wall collapses in abandoned terraces

Autor:

Gonzalo J. Fernández Olloqui

Directores:

Noemí Solange Lana-Renault Monreal

Jorge Lorenzo Lacruz

Fernando Pérez Cabello

Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza
Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del
Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección
12 de noviembre de 2021

Índice

Resumen.....	2
Abstract	2
1. Introducción	3
2. Objetivos	4
3. Área de estudio	5
4. Metodología	7
4.1. Inventario de derrumbes	7
4.2. Obtención de datos (nubes de puntos) y fuentes de información	7
4.3. Obtención de los Modelos Digitales del Terreno	10
4.4. Validación de los MDTs	12
4.5. Detección de derrumbes: Aplicación de los métodos hidro-topográfico y OBIA	14
4.5.1. Método hidro-topográfico	14
4.5.2. Método OBIA (Object Based Image Analysis)	15
4.6. Validación de los derrumbes detectados	17
5. Resultados	18
5.1. Caracterización de los derrumbes inventariados.....	18
5.2. Validación de los MDTs	23
5.3. Derrumbes detectados por el método hidro-topográfico	27
5.4. Derrumbes detectados por el método OBIA.....	31
6. Discusión	34
6.1. Inventario de derrumbes y caracterización	34
6.2. Obtención de datos (nubes de puntos) y fuentes de información	34
6.3. Obtención y validación de los MDTs	35
6.4. Detección de derrumbes: método hidro-topográfico.....	35
6.5. Detección de derrumbes: método OBIA	36
7. Conclusiones.....	37
8. Agradecimientos	38
9. Bibliografía y fuentes.....	38

Resumen

En este trabajo se lleva a cabo una evaluación de metodologías para la detección remota de derrumbes en bancales abandonados. Se utilizan las nubes de puntos extraídas mediante tres fuentes de información remota distintas: LiDAR aeroportado, LiDAR terrestre y fotogrametría aeroportada a las que se aplicaron dos técnicas (interpolación y SfM, *Structure from Motion*) para la obtención de diferentes modelos digitales del terreno (MDT). La detección de derrumbes en muros de bancales abandonados se realizó implementando dos métodos diferenciados: uno hidro-topográfico y otro orientado a objetos (OBIA, *Object Based Image Analysis*). Los resultados indican un mejor rendimiento del método OBIA frente al método hidro-topográfico en la detección de derrumbes, y ponen de manifiesto la complejidad y el alto grado de experimentalidad de los análisis realizados. El trabajo concluye recomendando mejoras en las metodologías aplicadas para aumentar la precisión en la detección de derrumbes en futuros estudios.

Palabras clave: Bancales abandonados, derrumbes, LiDAR, SfM, OBIA, microtopografía.

Abstract

In this MSc Thesis, an evaluation of methodologies for the remote detection of wall collapses in abandoned terraces is carried out. Point clouds extracted from three different remote data sources are used: airborne LiDAR, terrestrial LiDAR and airborne photogrammetry. Two techniques (interpolation and SfM, *Structure from Motion*) were applied in order to obtain digital terrain models (DTM) from these data. The detection of wall collapses in abandoned terraces was carried out by implementing two differentiated approaches: a hydro-topographic approach and an approach based on Object Based Image Analysis (OBIA). The results indicate a better performance of the OBIA method in comparison to the hydro-topographic, and reveal the complexity and high degree of experimentality of the analysis. The work concludes with recommendations based on improvements in the applied methodologies applied to increase the precision in the detection of wall collapses in future studies.

Key words: Abandoned terraces, wall collapses, LiDAR, SfM, OBIA, microtopography

1. Introducción

Históricamente, los bancales (o terrazas de cultivo) han sido un recurso agrícola que ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de los pueblos de montaña en todo el mundo y, de forma especial, en las áreas de influencia mediterránea. En España, están presentes en el Pirineo centro oriental, en el Maestrazgo aragonés y castellonense, en el Sistema Ibérico, en áreas montañosas de Alicante y Valencia, en algunos sectores de las Béticas y en la montaña balear (Lasanta Martínez et al., 2013).

En el Sistema Ibérico riojano, los bancales jugaron un papel económico muy importante, siendo especialmente representativos en los valles del Leza, Jubera y Cidacos. En este último, un estudio determinó que el porcentaje de superficie abancalada con respecto al total de la superficie cultivada llegó a ser del 92,5% (Arnáez et al., 2009). Lo que proporciona una idea de la importancia que llegaron a tener para el desarrollo económico de la región.

El abancalamiento de las laderas respondió a la necesidad de disponer de espacios cultivables en relieves abruptos, especialmente en épocas de mayor presión demográfica en las áreas de montaña. Estos bancales o terrazas proporcionaron zonas llanas y fértiles, que favorecían la infiltración del agua y reducían la erosión, permitiendo así su cultivo. La delimitación entre un bancal y otro podía hacerse mediante un muro de piedra seca o un talud recubierto por vegetación.

Sin embargo, a lo largo del siglo XX, la mayor parte de estos espacios dejaron de cultivarse y se abandonaron. Como consecuencia de la falta de mantenimiento, los bancales entraron en una etapa de deterioro dando lugar a procesos de sucesión vegetal y degradación de los mismos (García-Ruiz and Lana-Renault, 2011). Este proceso puede favorecer la restauración del perfil original de la ladera, debido a la reactivación de los procesos de escorrentía y deslizamientos de tierra, antiguamente controlados por la intervención humana (Tarolli, Preti and Romano., 2014) y ha supuesto un deterioro del valor y de la calidad del paisaje abancalado (Lasanta et al., 2013).

El abandono de los bancales ha sido objeto de estudio de muchos trabajos a diferentes escalas. Se han estudiado los procesos de degradación y erosión del suelo (Lasanta et al., 2001) (Tarolli et al., 2014), procesos de reforestación (Pérez-Cabello., 2011) y también procesos hidrológicos (Gallart et al., 1994).

Posiblemente el proceso geomórfico más destacable tras el abandono es el desplome (o derrumbe) de los muros de piedra. Este es un proceso que ocurre desde el momento en el que se decide transformar el perfil original de la ladera. Mientras estas áreas se encuentran cultivadas, el agricultor debe dedicar parte de su tiempo y esfuerzo a reducir o evitar estos desplomes mediante un minucioso cuidado del bancal. El abandono de las tierras de cultivo implica una falta de mantenimiento de los muros (y de los sistemas de drenaje) de modo que los bancales comienzan un proceso de degradación y los derrumbes son cada vez más frecuentes (Moreno-de-las-Heras et al., 2019).

La génesis de los derrumbes puede atribuirse principalmente a factores hidrológicos ligados a procesos de escorrentía subsuperficial (Preti et al., 2018) y saturación prolongada de la parte interna de la terraza (Gallart et al., 1994). También puede mencionarse la propia inestabilidad de una estructura que se construye a partir de la acumulación de cantos de distinto tamaño (Arnáez et al., 2009).

El derrumbe de los muros de piedra en las laderas abancaladas tiene importantes implicaciones hidro-geomorfológicas entre las que destacan un aumento de las tasa de erosión y pérdida de

suelo (Moreno-de-las-Heras *et al.*, 2019), un incremento de la inestabilidad de las laderas, la aparición de nuevas fuentes de sedimento que aportan material a los cauces, la restitución de antiguos barrancos que habían quedado ocultos bajo la red de bancales (Tarolli, Preti and Romano, 2014) o un aumento de la conectividad hidrológica (Calsamiglia *et al.*, 2018). Identificar y analizar la dinámica espaciotemporal de los derrumbes en los muros de piedra es fundamental para el estudio de todos estos procesos.

La identificación de los derrumbes en laderas abancaladas puede hacerse mediante inventarios de campo. No obstante, es un procedimiento costoso y con importantes limitaciones espaciales. Su detección y seguimiento mediante técnicas de teledetección constituye una alternativa interesante que, hasta el momento, ha sido poco explorada, destacando los trabajos de (Cucchiari *et al.* 2020) y (Pijl *et al.* 2021)

Por el contrario, sí que existen numerosos trabajos que han utilizado técnicas de teledetección para el estudio de la dinámica de procesos geomorfológicos en otros ambientes, por ejemplo: (Nadal-Romero *et al.* 2015) y (Ferrer, Errea, Alonso, Gómez-Gutiérrez, *et al.* 2017) aplicaron láser escáner terrestre y fotogrametría terrestre y aerotransportada con técnicas SfM (*Structure from Motion*) para el estudio de la erosión en zonas de cárcavas, en el Pirineo aragonés y la Depresión del Ebro. Xu *et al.* (2020) estudiaron la monitorización y teledetección de grandes deslizamientos de tierra en loess en la meseta de Huangtu (China) mediante el uso de fotogrametría aeroportada. (Van den Eeckhaut *et al.* 2012) aplicaron la segmentación orientada a objetos (OBIA, *Object Based Image Analysis*, usado también en este trabajo) con datos LiDAR y la generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT) para la identificación de deslizamientos en áreas forestales en la provincia de Flandes Oriental, Bélgica. (Pawłuszek *et al.* 2019) aplicaron el mismo método para analizar su capacidad de detección de deslizamientos tanto en áreas forestales como agrícolas en Polonia. En este caso utilizaron un mayor número de derivadas del MDT.

Este trabajo se centra en la detección de derrumbes en muros de bancales abandonados mediante el uso de diferentes técnicas de teledetección y metodologías para su identificación. Para ello se comparan tres técnicas de adquisición de datos y generación de MDT (LiDAR aeroportado, LiDAR terrestre y fotogrametría aeroportada), y dos métodos de detección de derrumbes (método hidro-topográfico y OBIA, *Object Based Image Analysis*), aplicados en una ladera abancalada.

2. Objetivos

El objetivo principal del trabajo es determinar la efectividad de tres técnicas de teledetección (LiDAR aeroportado, LiDAR terrestre y fotogrametría aeroportada) para la obtención de modelos digitales Terreno (MDT), y dos métodos (hidro-topográfico y OBIA, orientado a objetos) para la detección de derrumbes en bancales abandonados en una ladera (6,54 ha) en el término municipal de Munilla, en el valle del Cidacos, en el Sistema Ibérico Riojano.

Para ello se definen los siguientes objetivos específicos:

Realizar un inventario y caracterización de los bancales que ocupan el área de estudio.

- Generar, a partir de cada una de las tres fuentes de información utilizadas, distintos MDT con una precisión y resolución espacial diferentes
- Detectar los derrumbes de los muros usando dos métodos: uno hidro-topográfico y otro orientado a objetos (OBIA).
- Validar la detección de derrumbes a partir de la información tomada en campo y determinar la causa de los posibles errores.

- Evaluar la dificultad de cada metodología, su rendimiento, sus resultados y su facilidad de implementación con el fin de recomendar el uso de un método u otro de cara a la realización de futuros trabajos.

3. Área de estudio

El área de estudio de este trabajo es una ladera situada en la cuenca experimental “San Vicente de Munilla”, monitorizada por el grupo de investigación EUSOT (Erosión, Usos del Suelo y Ordenación del Territorio) de la Universidad de la Rioja. La cuenca se localiza en el término municipal de Munilla, en el valle del Cidacos, entre las sierras de La Hez y de Préjano, en el Sistema Ibérico riojano. Tiene una superficie aproximada de 190 hectáreas y una altitud comprendida entre los 770 y los 1170 metros sobre el nivel del mar. Esta cuenca está drenada por el barranco de La Canal, afluente del río Manzanares que desemboca en el Cidacos.

Geológica y geomorfológicamente hablando, el área se compone en su totalidad de materiales secundarios de la facies Weald, arcillas y limonitas en la zona norte y margas y calizas en el área sur, que han dado lugar a unos relieves suaves, aunque con multitud de escalones estructurales sobre litologías calcáreas más resistentes, excavados por el propio barranco, cuyas laderas tienen una pendiente media en torno al 21% (Lana-Renault et al., 2014)

Munilla presenta un clima mediterráneo de montaña, que se catalogaría como Cfb (templado lluvioso cálido sin estación seca) según la clasificación de Köppen y Geiger. La temperatura promedio a lo largo del año es de 11°C, siendo julio con 20°C de media el mes más caluroso y enero con 3°C de media el más frío. Las precipitaciones medias anuales se sitúan entre los 500 y los 700mm, siendo mayo con 66mm promedio el mes más lluvioso y julio con 31mm de media el más seco. Es destacable que Munilla registra una cantidad significativa de lluvia durante todos los meses del año, incluso para el mes más seco.

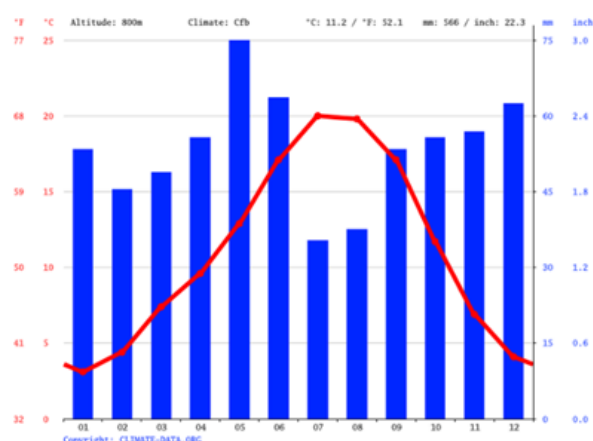


Figura 1: Climograma de Munilla (ClimateData.org).

La vegetación potencial de la zona se corresponde con formaciones de encina (*Quercus ilex*) y quejigo (*Quercus faginea*). Sin embargo, este tipo de vegetación apenas tiene representación debido a la intensa roturación de las laderas y la construcción de los bancales durante los siglos VIII y XIX. La superficie abancalada de la cuenca ocupa aproximadamente el 40 % de su superficie. En la mayor parte de los casos están delimitados por un muro de piedra entre 1 y 4 m de altura en función de la pendiente de la ladera. Estuvieron en cultivo (cereal) hasta mediados de los años sesenta del siglo XX, cuando se abandonan prácticamente por completo (Lana-Renault et al., 2014). Actualmente sobre los bancales se extienden formaciones de matorral compuestas por aligas (*Genista scorpius*) y jaras (*Cistus laurifolius*) y prados de diente de león (Rubio Sesma et al., 2013), que aprovecha el ganado vacuno en régimen extensivo.

La ladera de estudio (Figura 2) tiene una superficie de 6.45 ha y se sitúa en la margen izquierda del barranco, entre los 850 y los 950 metros de altitud. Se decide trabajar en esta ladera porque se encuentra en su totalidad abancalada y, además, es objeto de estudio del grupo de investigación EUSOT.

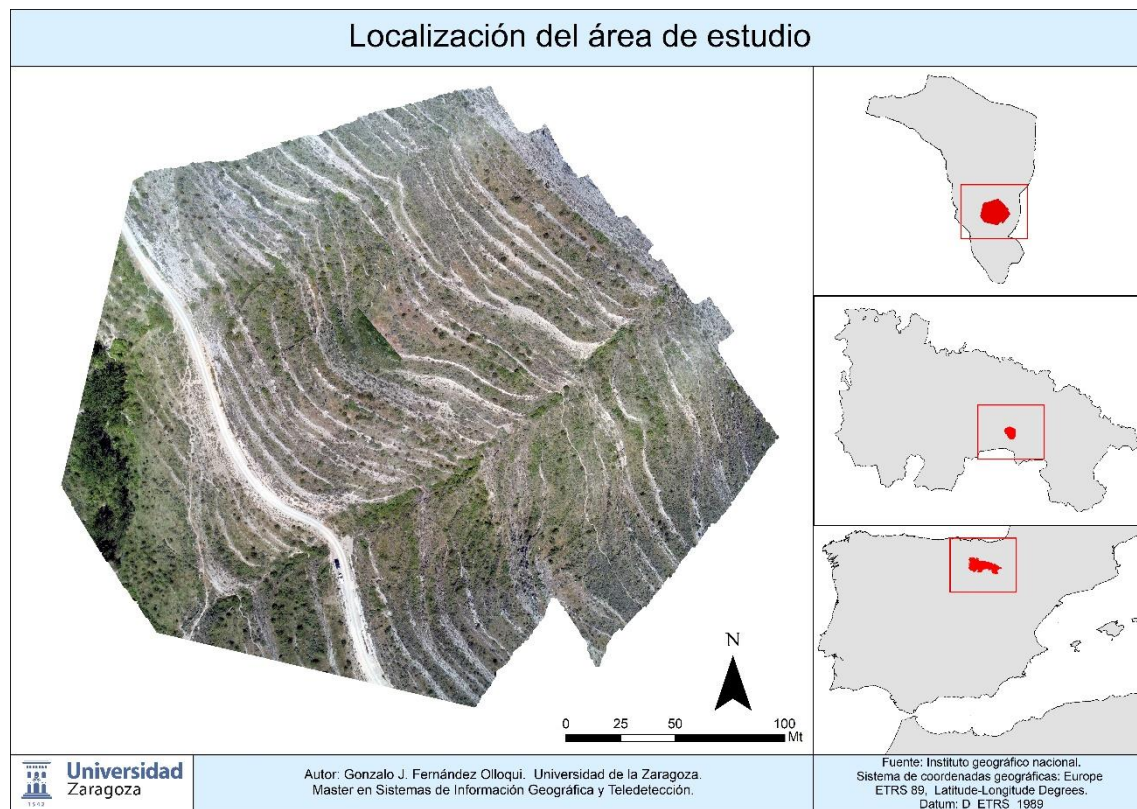


Figura 2: Mapa de localización del área de estudio.



Figura 3: Vista general de la ladera donde se realiza el estudio

4. Metodología

En el siguiente apartado se describen todos los pasos llevados a cabo a lo largo de este trabajo, desde la obtención de los datos, su transformación en distintos MDT y cada una de las fases de los análisis de detección de derrumbes y validación de los resultados obtenidos.

4.1. Inventario de derrumbes

En este apartado se describe el inventario de derrumbes llevado a cabo en el marco de este TFM, que incluye la localización y características básicas de los mismos: dimensiones, porcentaje de cubierta vegetal y concavidad. La realización de este inventario es esencial para una vez realizados los análisis poder validar los resultados.

Es necesario mencionar que se disponía de un primer inventario proporcionado por el grupo de investigación EUSOT (Erosión, Usos del Suelo y Ordenación del Territorio) de la Universidad de la Rioja. Éste contaba con un total de 79 derrumbes incluidos en el área de estudio en forma de capa de puntos vectorial. Puesto que estos derrumbes no estaban caracterizados se realizó una salida de campo en julio de 2021, momento en el que se aprovechó también para realizar el vuelo del dron para la aplicación de la metodología SfM (ver apartado 4.2)

Durante la salida de campo se inventariaron un total de 23 derrumbes y se tomó la siguiente información sobre su localización y algunas de sus características (Tabla 1):

Altura (m)	Longitud (m)	Concavidad (SI / NO)	Vegetación (%)	Coordenada (Y)	Coordenada (X)
Se mide en metros la altura del derrumbe.	Se mide en metros la longitud de la cicatriz del derrumbe.	Se determina si debido al desprendimiento de tierra, el derrumbe es cóncavo o no.	Se determina el porcentaje de vegetación que existe en la cicatriz.	Se toman los datos de la coordenada Y.	Se toman los datos de la coordenada X.

Tabla 1: Información adquirida durante el inventario de derrumbes.

Cabe destacar que los derrumbes objeto de estudio son derrumbes gravitacionales. No se han tenido en cuenta los taludes entre bancales despojados de piedras por acción antrópica.

4.2. Obtención de datos (nubes de puntos) y fuentes de información

Para la realización del estudio se han utilizado los datos extraídos mediante tres técnicas de teledetección distintas. La información básica de cada una aparece en las tablas a continuación (Tablas 2, 3 y 4), así como una representación de cada una de las nubes de puntos a color, representadas en función de la altura (Figuras 4, 5 y 6).

Teniendo en cuenta la información de cada una de las nubes de puntos se observa que no coinciden ni en resolución (característica que se deriva de la densidad de puntos), ni en tiempo de captura. Por lo tanto, las comparaciones que se realicen entre los resultados de los análisis de cada una de ellas serán comparaciones mixtas: tanto cuantitativas como cualitativas.

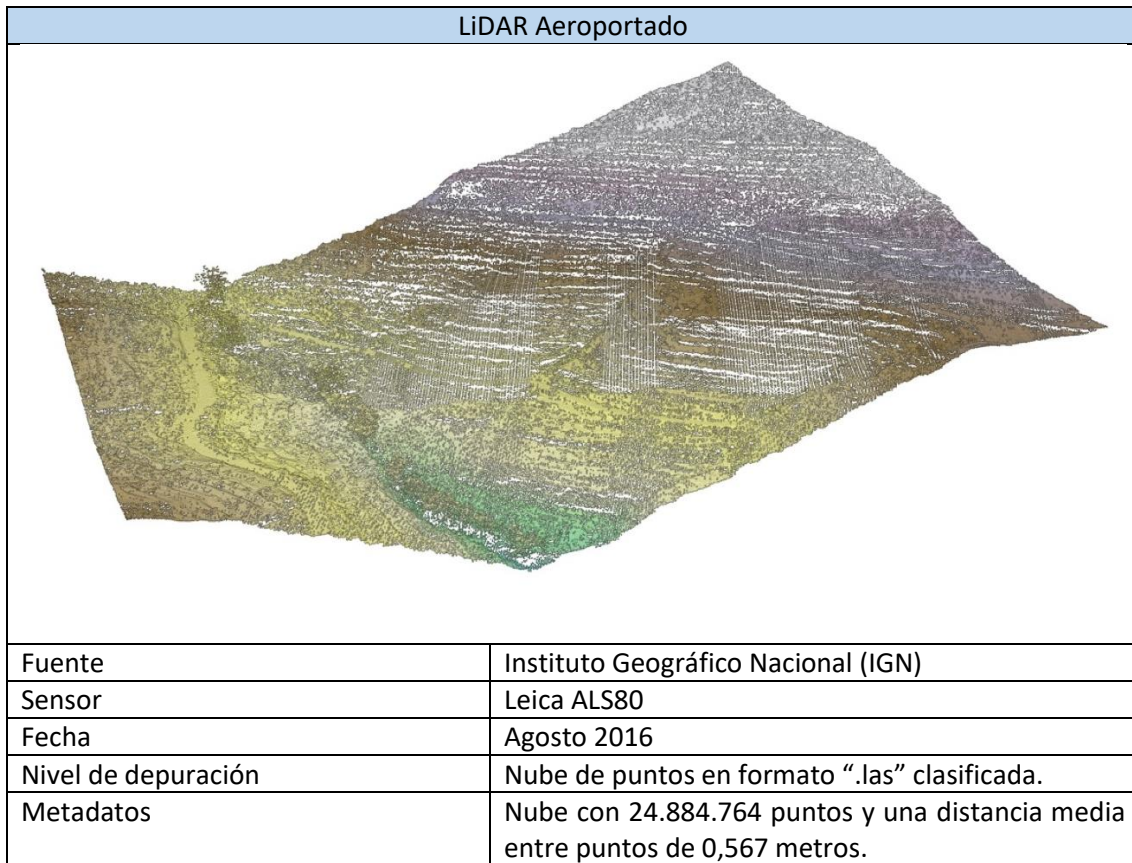


Figura 4: Representación de la nube de puntos del LiDAR aeroportado.

Tabla 2: Información básica del LiDAR aeroportado.

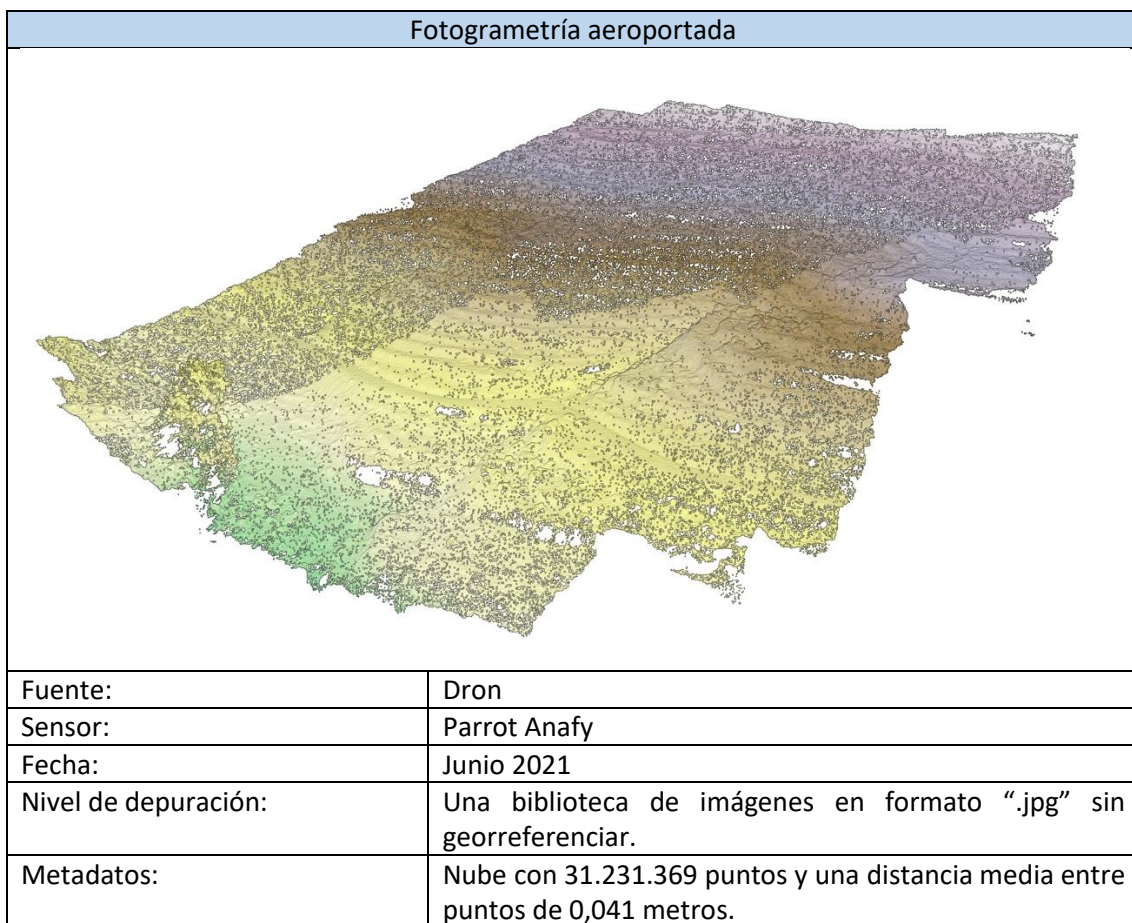


Figura 5: Representación de la nube de puntos de la fotogrametría aeroportada.

Tabla 3: Información básica de la fotogrametría aeroportada.

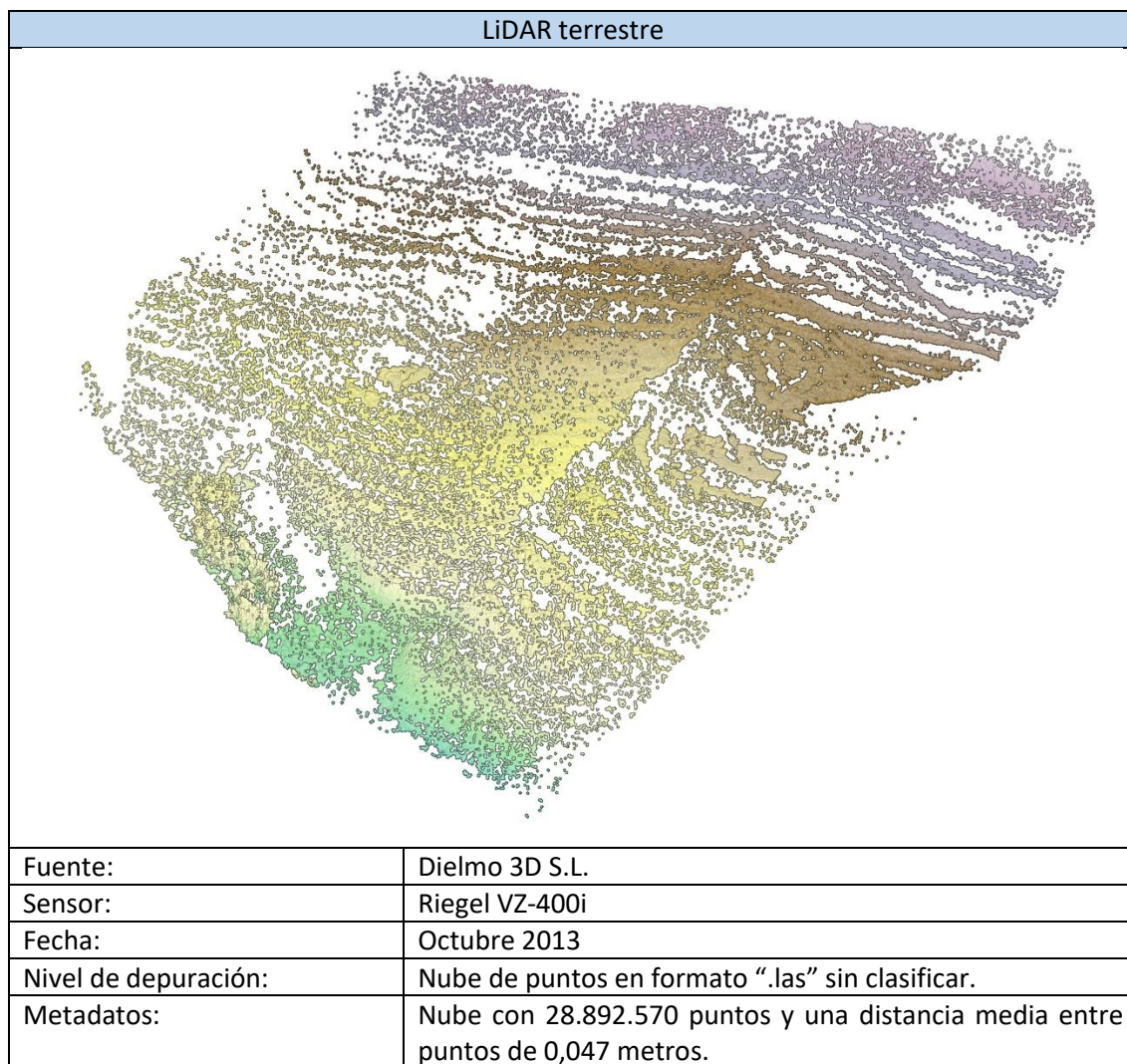


Figura 6: Representación de la nube de puntos del LiDAR terrestre.

Tabla 4: Información básica del LiDAR terrestre.

Las distorsiones que se ven en la anterior figura (Figura 6) son provocadas por artefactos desconocidos. Estos provocan un leve bandeado en la generación del MDT que impide aplicar la metodología OBIA (*Object Based Image Analysis*), como se verá más adelante en el trabajo (ver apartado 6.5)

4.3. Obtención de los Modelos Digitales del Terreno

El siguiente paso, se centra en conseguir tres Modelos Digitales del Terreno (MDT) con los que trabajar. Este apartado resulta crucial dado que la metodología aplicada posteriormente en este estudio trabaja con derivadas de los MDTs. Irregularidades en la obtención de los mismos, podría llegar a traducirse en fallos a la hora de detectar los derrumbes.

Como el tipo de dato obtenido de cada una de las técnicas de teledetección es distinto, los pasos necesarios para obtener su correspondiente MDT también es diferente. Cada uno de los procesos en detalle se muestra en el siguiente diagrama (Figura 7).

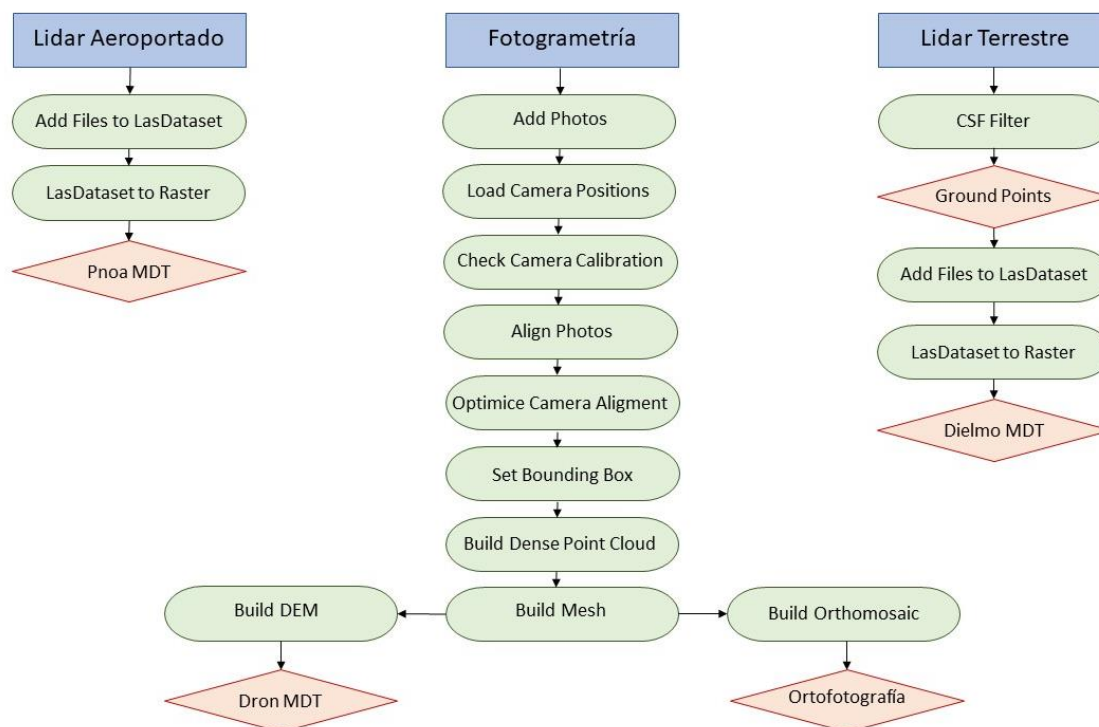


Figura 7: Diagrama de flujo para la obtención de los MDTs. En verde se indican las herramientas utilizadas, en rojo las capas resultantes.

Los pasos seguidos hasta la obtención del ráster “Pnoa MDT” son los más sencillos dado que el nivel de depuración de la nube de puntos era óptimo. Este proceso se llevó a cabo íntegramente con el software ArcCatalog de ArcGis (versión 10.7.1). El primer paso fue incluir la nube de puntos dentro de un nuevo LasDataset y posteriormente aplicar la herramienta “LasDataset to Raster” señalando que se usase exclusivamente los puntos de la clase 2 (suelo desnudo). Y también indicando que, en caso de existir más de un punto sobre una misma celda, aplicase la media entre ambos.

Para transformar una nube de puntos a ráster, el software aplica una interpolación. Dentro de la herramienta “LasDataset to Raster” se puede decidir qué tipo de interpolación aplicar. En este caso se usó “Average” como método para asignar el valor de la celda, que asigna el valor promedio de los puntos dentro de la celda, y “Linear” como método de relleno de vacíos, que realiza una triangulación en las áreas vacías y utiliza la interpolación lineal en el valor de triangulación para determinar el valor de celda (<https://pro.arcgis.com/>).

En el caso del LiDAR terrestre, los pasos fueron muy similares con una excepción. Como la nube de puntos no se encontraba clasificada, previamente se cargó la capa en el software CloudCompare (versión 2.12) y se aplicó un *plugin* de clasificación de nubes de puntos lidar automático denominado *CSF Filter* (Zhang *et al.*, 2016). Así se obtuvo una nube de puntos de suelo. Una vez aplicado el filtro, se interpolan (mismos métodos que en el caso anterior) los valores z de la nube de puntos de suelo para generar el ráster de altitudes “Dielmo MDT”.

Por último, la obtención del MDT a partir de la fotogrametría aeroportada fue el proceso más complejo. Para ello se aplicó la técnica SfM (*Structure from Motion*) la cual está considerada como un método fotogramétrico automatizado de alta resolución que crea una estructura 3D a partir de una superposición de imágenes ópticas obtenidas desde distintos puntos de vista ((Tomás, Riquelme and Cano, 2016).

Para su implementación se recurrió al software Agisoft Metashape (versión 1.7). El primer paso es añadir las fotos tomadas por el dron desde la herramienta “Add Photos”. Una vez cargadas las fotografías se debe indicar la posición desde donde fueron tomadas, para ello se aplica la herramienta “Load Camera Positions”. Se deben incluir en este paso la altitud de vuelo y el ángulo de la cámara, en este caso 70 metros y 90º respectivamente.

A continuación, se suceden tres pasos “Check Camera Calibration”, “Align Photos” y “Optimize Camera Calibration”. Estas tres herramientas aumentan la nitidez de las imágenes y la precisión en el solape de las mismas, optimizando así el resultado posterior. El siguiente paso es definir el área de trabajo en donde estará contenida la nube de puntos, para ello se utiliza la herramienta “Set Bounding Box”.

El siguiente paso es la construcción de la nube de puntos con la herramienta “Build Dense Cloud Point”, señalaremos en esta herramienta a que la calidad de salida sea lo más alta posible (considerando las limitaciones de procesamiento y potencia del equipo informático utilizado). A continuación, se usa la herramienta “Build Mesh” esta herramienta crea una malla poligonal a partir de la nube de puntos. A partir de esta malla se crean tanto el modelo digital de elevaciones como la ortofoto con las herramientas “Build DEM” y “Build Orthomosaic” respectivamente. El último paso es exportar en formato “.tif” estas dos capas ráster.

Se probaron diferentes softwares (McLidar, CloudCompare, Agisoft Metashape y el plugin “LasTools” en QGis) para intentar clasificar las nubes de puntos. Con todos ellos se realizaron pruebas ensayo y error hasta obtener la clasificación con mejores resultados. Como ya se ha mencionado finalmente se utilizó CloudCompare en el caso del LiDAR terrestre y Agisoft Metashape en el caso de la fotogrametría, tal y como habían usado previamente en sus estudios (Smith and Vericat, 2015) y (Cucchiari et al., 2020).

4.4. Validación de los MDTs

Como ya se mencionaba con anterioridad, la obtención de los MDTs resulta crucial para la realización del trabajo. Por ello se consideró necesario validar la calidad de los mismos antes de continuar con los análisis. Los pasos seguidos para la validación de los modelos digitales de elevación se muestran en el siguiente diagrama (Figura 8).

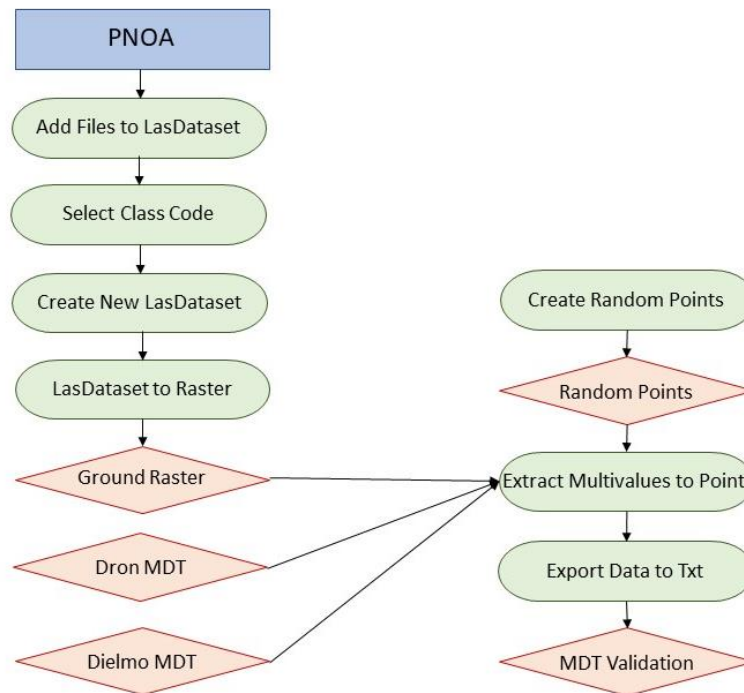


Figura 8: diagrama de flujo para la validación de los MDTs. En verde se indican las herramientas utilizadas, en rojo las capas resultantes.

En estos casos lo ideal sería una validación absoluta, tomando coordenadas en el eje Z de puntos de control en el campo con un GPS diferencial. Al no poder contar con este aparato la validación de los modelos se ha realizado de forma relativa, es decir, comparando los MDTs con los puntos de suelo del LiDAR aeroportado suministrados por el IGN (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, PNOA). Se elige validar con respecto a estos datos porque su acceso es público y por lo tanto todo el mundo puede obtenerlos a través del portal de descargas del IGN y, porque se conoce el RMSE (error cuadrático medio) de los datos en la coordenada Z, que es de 0,2 metros.

Para la realización de este proceso, se volvió a trabajar con el software ArcCatalog de ArcGis (versión 10.7.1). Primero se incluye la nube de puntos en un nuevo LasDataset y se seleccionaron todos aquellos puntos con clase 2, correspondientes al suelo. Y sin eliminar la selección se crea un nuevo LasDataset incluyendo exclusivamente los elementos seleccionados. Este nuevo Lasdataset se transforma en ráster con la herramienta “LasDataset to Raster”. Se debe señalar a la herramienta que no interpole los datos y que el caso de existir más de un punto sobre una misma celda se seleccione aquel con la altura menor.

A partir de este punto se dejó de trabajar con ArcCatalog y se empezó a trabajar con ArcMap, software del mismo desarrollador. En primer lugar, se genera una capa con 500 puntos aleatoriamente distribuidos por el área de estudio con la herramienta “Create Random Points”. Con esta capa de puntos, se aplica la herramienta “Extract multivalues to Point”, de tal forma que extrajese los valores de altura de los MDTs del LIDAR terrestre y de la fotogrametría aeroportada. Esto permitió la comparación de los 500 valores de altitud de estas dos fuentes de información con los valores de altitud obtenidos del MDT derivado de la nube de puntos del PNOA.

4.5. Detección de derrumbes: Aplicación de los métodos hidro-topográfico y OBIA

En este apartado se explican los dos métodos llevados a cabo a lo largo de este trabajo para la detección de los derrumbes en los muros de los bancales. Los pasos descritos se aplicaron a los tres MDTs creados y validados. El proceso seguido por cada método se detalla en los siguientes diagramas (Figuras 9 y 10).

4.5.1. Método hidro-topográfico

Este método se basa en la hipótesis de que los derrumbes en los muros de piedra generan una concavidad que puede ser detectada a partir de la red de drenaje generada a partir de los MDTs (Pijl et al., 2021). De este modo, donde la red de drenaje atraviesa un muro es muy probable que haya un derrumbe.

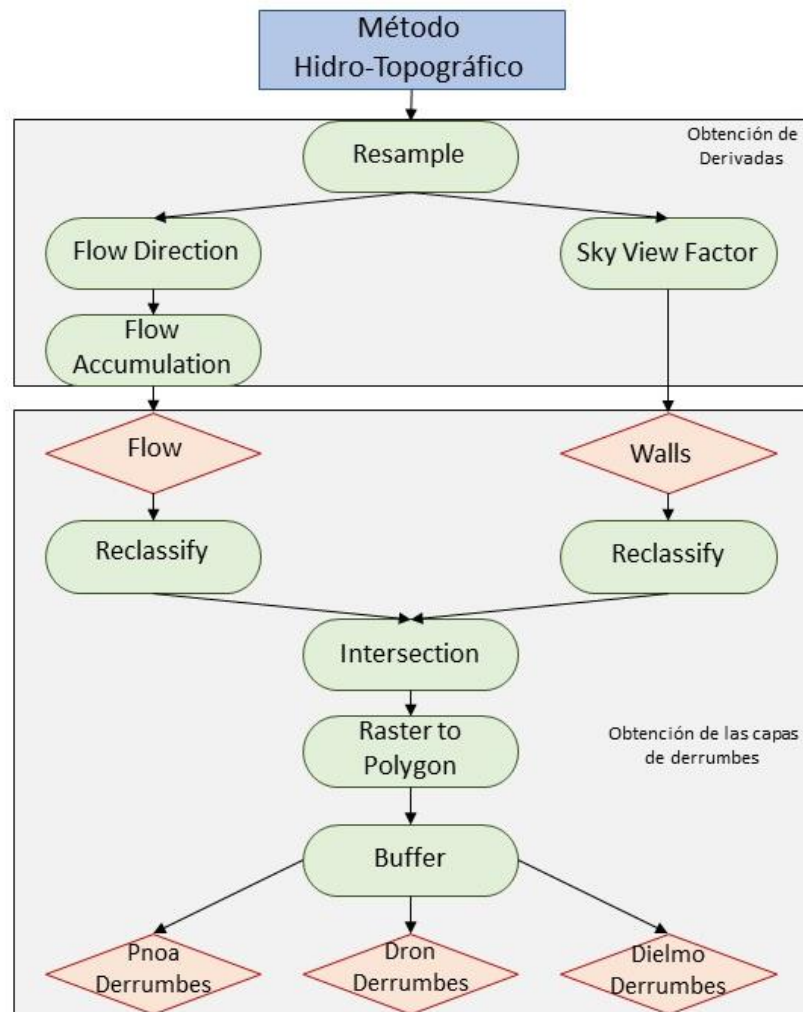


Figura 9: diagrama de flujo del método hidro-topográfico para la identificación de derrumbes. En verde se indican las herramientas utilizadas, en rojo las capas resultantes.

El procedimiento se realiza con el software ArcMap de ArcGis (versión 10.7.1), excepto un pequeño paso que se indica más adelante. Se empieza realizando un cambio en la resolución de los MDTs generados a partir del LIDAR terrestre y la fotogrametría. El motivo es doble, por un lado, evitar ruido y reducir la rugosidad y, por otro lado, homogeneizar las resoluciones para ajustarlos al MDT de mayor resolución (LIDAR PNOA, con resolución de 1 metro). Para ello se usa la herramienta "resample".

El siguiente paso es la creación de dos derivadas a partir del MDT. La primera de ellas se calcula aplicando el algoritmo “Flow Direction” sobre el MDT, que nos indica para cada píxel la dirección del flujo (por ejemplo, agua) que se mueve ladera abajo siguiendo la máxima pendiente. Sobre esta variable se aplica el algoritmo “Flow Accumulation”, que indica para un píxel, la suma acumulada de todos los píxeles que drenan a ese píxel (<https://pro.arcgis.com/>). A esta capa la denominaremos “Flow”.

El siguiente paso es reclasificar con la herramienta “Reclassify” la capa “Flow” para obtener, mediante un umbral definido por ensayo-error, una red de drenaje apropiada para nuestro objeto de estudio (“Flow Reclasificada”). Así, se reclasifican como 0 todos aquellos píxeles cuyo valor sea menor a 500 y con valor 1 todos aquellos píxeles con valor superior a 500.

La siguiente derivada se calcula para obtener una capa de muros de bancales. Se genera con el software QGIS Desktop (versión 3.16.7 Hannover) aplicando la herramienta “Sky View Factor” sobre el MDT. Esta derivada resalta las diferencias entre píxeles vecinos mediante el cálculo del ratio de la distancia entre el cielo visible y el centro del hemisferio al que se corresponde el píxel analizado (Oke et al., 1982). Da como resultado un ráster denominado “Walls”.

De cara a detectar los muros hubo que probar diferentes herramientas hasta seleccionar aquella con los mejores resultados. Se probaron y compararon tres herramientas: “Edge Detection”, “Sobel Filter” y “Sky View Factor”. La primera y la segunda herramienta se basan en la aplicación de un filtro laplaciano destinado a resaltar las diferencias que existen entre píxeles vecinos. Finalmente se decidió utilizar esta última tras una comparativa visual.

El siguiente paso es reclasificar con la herramienta “Reclassify” la capa “Walls”. Se definió un umbral mediante ensayo-error para detectar los muros (finalmente, aquellos píxeles con menor valor de Sky View Factor, $< 0,9$). A la capa resultante se le ha denominado “Walls Reclasificada”.

Con ambas capas reclasificadas, se aplica una intersección entre ellas gracias a la herramienta “Raster Calculator” multiplicando “Flow Reclasificada” por “Walls Reclasificada”. La multiplicación del ráster de acumulación de flujos por el ráster de muros da como resultado un conjunto de píxeles que se corresponden con la red de drenaje que fluye a través de los muros de los bancales, delimitando zonas que potencialmente se pueden corresponder a derrumbes.

Debemos tener en cuenta que las zonas en las que se considera que existe probabilidad de derrumbe miden un metro, dado que esa es la resolución del MDT introducido. Pero, como veremos en el siguiente apartado, los derrumbes detectados en esta ladera tienen de media una longitud aproximada de 2x5 metros y por lo tanto una zona más pequeña que ese valor podría llegar a no detectar derrumbes cuando más adelante se aplique la validación del método. Para subsanar esta situación se aplica la herramienta “Buffer” con un valor de radio de 2,5 m sobre la capa derrumbes detectados vectorizada. De esta forma conseguimos ampliar el tamaño de las zonas donde hay probabilidad de que exista un derrumbe reduciendo así la posibilidad de omisión a la hora de validar la detección de derrumbes realizada.

4.5.2. Método OBIA (Object Based Image Analysis)

El análisis orientado a objetos permite estudiar imágenes remotas atendiendo a criterios espaciales. A diferencia de los métodos basados en análisis espectrales píxel a píxel, mediante OBIA se segmentan las imágenes agrupando píxeles en polígonos o segmentos, cuyos atributos y características permiten su clasificación. Cabe destacar que el método OBIA ha sido utilizado para la detección de deslizamientos de centenares de metros (Li et al., 2015; Pawłuszek et al.,

2019), y que el uso que se hace aquí está enfocado a la detección de derrumbes métricos o submétricos (microtopografía).

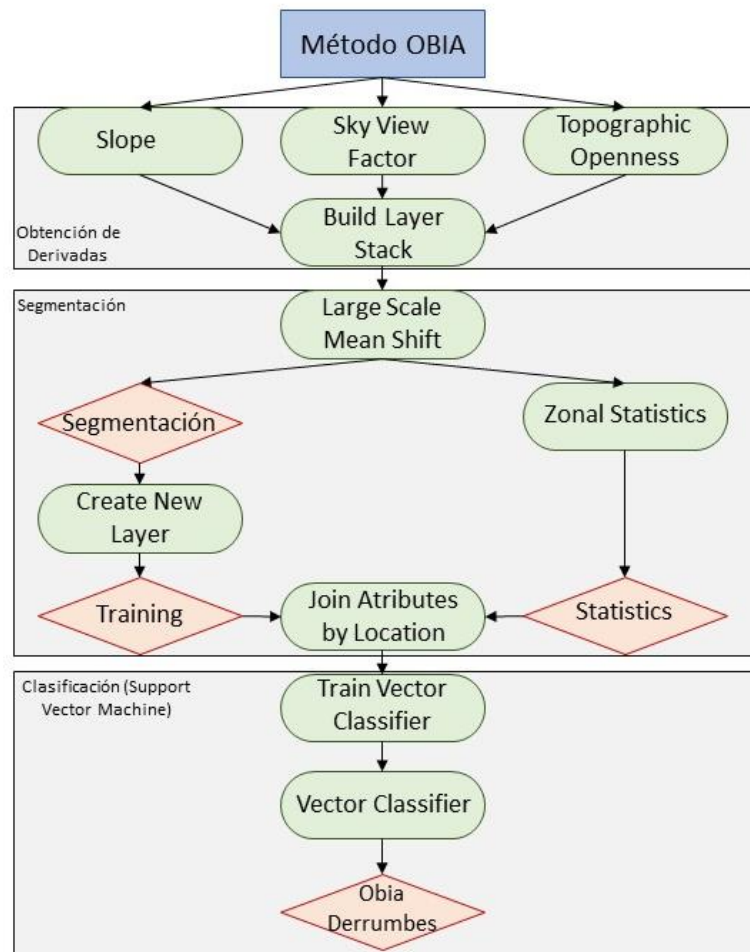


Figura 10: diagrama de flujo del método OBIA para la identificación de derrumbes. En verde se indican las herramientas utilizadas, en rojo las capas resultantes.

La segmentación se realizó el plugin “Orfeo Tool Box” (OTB, versión 7.4) e instalarlo en el software QGIS Desktop donde se realizarán todos los pasos necesarios. En primer lugar, se deben obtener tres capas ráster derivadas del MDT. Se aplicarán para ello las herramientas “Slope”, “Sky View Factor” y “Topographic Openness” (Pawłuszek et al., 2019). Una vez obtenidos los ráster se integraron en un solo ráster multibanda a través de la herramienta “Build Layer Stack”.

Con este ráster multibanda, se aplica el algoritmo de segmentación, en este caso se utiliza la herramienta contenida dentro del plugin previamente instalado “Large Scale Mean Shift”. Esta herramienta crea polígonos agrupando píxeles de características y atributos similares (considerando las 3 derivadas del MDT generadas previamente), que se ha considerado que conforman una superficie diferenciada. Por ejemplo: una lámina de agua, suelo desnudo, vegetación o, en el caso que nos interesa, derrumbes. A la capa de polígonos obtenida se denominará “Segmentación”.

A continuación, se aplica la herramienta “Zonal Statistics” para extraer en forma de tabla aquellas características y atributos diferenciados que han llevado a la herramienta de

segmentación a la creación de los polígonos que conforman la capa “Segmentación”. A la capa donde se incluyen las estadísticas de los polígonos se denomina “Statistics”.

El método utilizado para la clasificación de los segmentos *Support Vector Machine* (SVM), un algoritmo que ha sido ampliamente utilizado para la clasificación basada en objetos, por la robustez de los resultados que obtiene (Mora et al., 2018); (Pawłuszek et al., 2019); (P. Lourenço et al., 2021). La clave de este método es realizar un correcto entrenamiento del “Support Vector machine” es decir, del algoritmo de clasificación. A partir de esta la capa “Segmentación” se creará una muestra de entrenamiento mediante la selección manual de veinte polígonos considerados derrumbes. El siguiente paso es unir a la tabla de atributos de la capa de entrenamiento las estadísticas que definen cada uno de esos polígonos contenidas dentro de la capa “Statistics”. Para ello se usará la herramienta “Join Attributes by Location”.

A continuación, se aplicó el algoritmo de OTB “Train Vector Classifier” sobre la capa de entrenamiento unida a sus estadísticas. Finalmente, se aplicó el algoritmo “Vector Classifier” para clasificar todos los polígonos de nuestra capa “Segmentación”, obteniendo como resultado una capa donde el algoritmo ha clasificado automáticamente todos aquellos polígonos que ha considerado derrumbes.

4.6. Validación de los derrumbes detectados

En este apartado se describe el proceso de validación seguido para evaluar la precisión de los métodos de detección de derrumbes aplicados, hidro-topográfico y OBIA. Este apartado resulta crucial ya que nos permite aportar una magnitud cuantitativa, en forma de porcentaje de acierto o error, de la eficiencia de cada uno de los métodos aplicados. El proceso de validación seguido se resume en el siguiente diagrama (Figura 11):

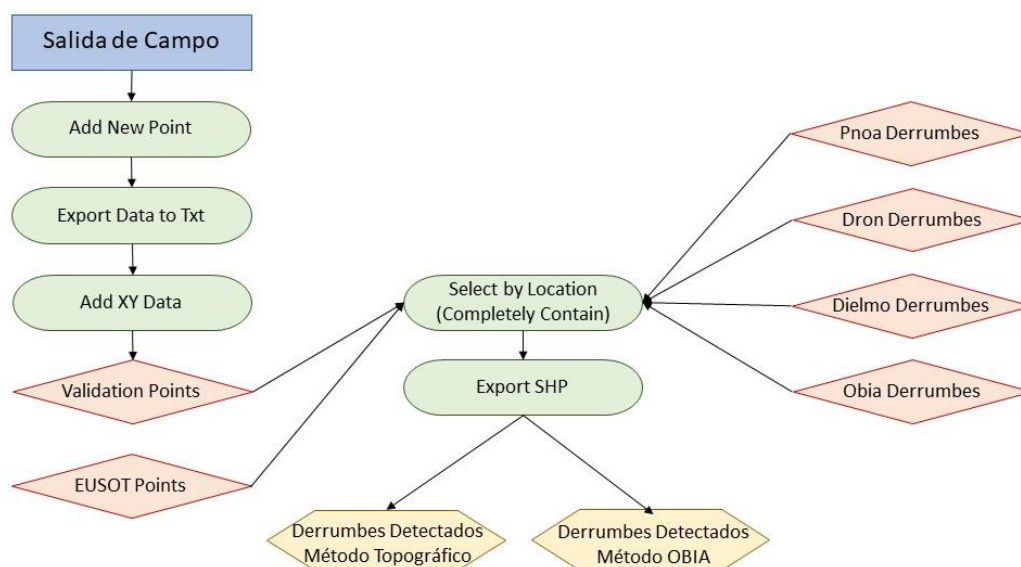


Figura 11: diagrama de flujo del proceso de validación. En verde se indican las herramientas utilizadas, en rojo las capas resultantes.

Como se ha mencionado en el apartado 4.1, para este trabajo se ha dispuesto de 102 derrumbes para la validación: 23 tomados en campo y 79 proporcionados por EUSOT en una capa vectorial.

Para el caso de los 23 derrumbes inventariados en el marco de este TFM, el primer paso fue obtener los datos de las coordenadas tomadas en campo. Para ello, lo ideal hubiese sido

disponer de un GPS diferencial. Como no ha sido posible adquirir uno para este proyecto, las coordenadas de cada derrumbe se tomaron con una aplicación desde el móvil. Dicha aplicación era Carto Druid desarrollada por Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL).

Desde esta aplicación con la herramienta “Add New Point” se guardan las coordenadas del punto donde se habían tomado, de esta forma se fue obteniendo la posición de los derrumbes. Posteriormente estas coordenadas fueron exportadas a formato “.txt” y desde el software ArcGis con la herramienta “Add XY Data”, se incluyen desde el archivo seleccionado las coordenadas en forma de puntos. A esta capa de puntos se le denominará “Validation points”.

El siguiente paso es comprobar el número de derrumbes que han sido detectados por los métodos hidro-topográfico y OBIA. Para ello aplicamos la herramienta “Select by Location”, seleccionando la función “Completely Contain”. De esta forma se seleccionan los derrumbes incluidos en la capa “Validation Points” que se encuentran dentro de los polígonos que los distintos métodos han detectado como derrumbe.

Una vez seleccionados aquellos derrumbes detectados por los métodos tanto hidro-topográfico como OBIA, se exportan como una capa diferente con la herramienta “Export SHP” para poder trabajar con ellos. Los datos de acierto, omisión y sobreestimación se calculan y se cargan en una hoja de cálculo para extraer de ellos los porcentajes y poder elaborar un informe de efectividad de cada uno de los métodos.

5. Resultados

A continuación, se describen los diferentes resultados obtenidos de todos los análisis realizados.

5.1. Caracterización de los derrumbes inventariados

La siguiente tabla (Tabla 5) resume las características generales de los 23 derrumbes inventariados.

Longitud media de los derrumbes (m)	4,53
Altura media de los derrumbes (m)	1,71
Porcentaje de derrumbes cóncavos (%)	60,90
Porcentaje de derrumbes con vegetación (%)	82,60

Tabla 5: tabla de descripción de los derrumbes.

La longitud media de los derrumbes inventariados es de 4,5 metros, midiendo el más pequeño 2,1 metros y el más grande 9,45 metros. La altura media de los derrumbes es de 1,7 metros, midiendo el más bajo unos 0,8 metros y el más alto 2,7 metros.

La mayoría de los derrumbes son cóncavos, es decir, van acompañados de pequeños movimientos en masa formando una concavidad en el bancal y acumulación de material a los pies del muro. En total, 14 de los 23 banales inventariados presentan concavidad, un 60,9%, mientras que 9 de ellos no la presentan y, por lo tanto, el derrumbe no había provocado un movimiento de tierra.

De igual modo, la mayoría de los derrumbes (19 con respecto al total) están parcialmente vegetados. La vegetación que se puede encontrar sobre los desprendimientos es tanto herbácea como arbustiva. Los porcentajes de cubierta vegetal eran muy variados, 5 de ellos no presentaban vegetación, 8 se encontraban con porcentajes de vegetación inferiores al 25%, 6 de ellos presentan entre un 25% y un 50 % de vegetación y cuatro de ellos mostraban una

superficie vegetada de más del 50 %, entre los que destaca un derrumbe con 90% de su a superficie ocupada por vegetación.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de los derrumbes inventariados (Figuras 12, 13 y 14) con sus respectivas características en forma de tabla (Tablas 6, 7 y 8) con la información tal y como fue tomada en campo. Y, también, la distribución sobre la ladera de los 102 derrumbes utilizados para la validación (Figura 15).

Ejemplo de derrumbe inventariado	
	
Longitud del derrumbe	3,9 m
Altura del derrumbe	2 m
Concavidad	Sí
Porcentaje de vegetación	5 %

Figura 12: Ejemplo de derrumbe inventariado.
Tabla 6: Características básicas del derrumbe.

Ejemplo de derrumbe inventariado



Longitud del derrumbe	4,1 m
Altura del derrumbe	1,2 m
Concavidad	Sí
Porcentaje de vegetación	10 %

Figura 13: Ejemplo de derrumbe inventariado.

Tabla 7: Características básicas del derrumbe.

Ejemplo de derrumbe inventariado



Longitud del derrumbe	5,5 m
Altura del derrumbe	1,7 m
Concavidad	No
Porcentaje de vegetación	80 %

Figura 14: Ejemplo de derrumbe inventariado.
Tabla 8: Características básicas del derrumbe.

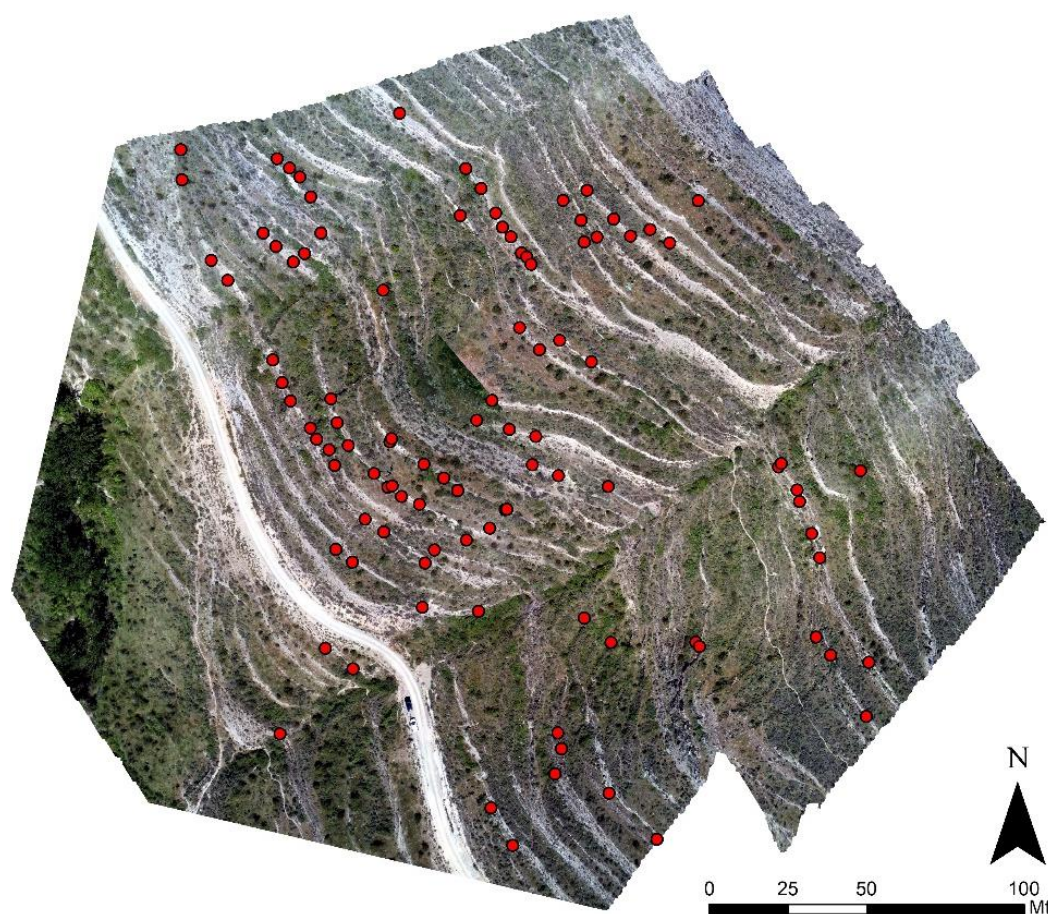


Figura 15: Localización de los derrumbes utilizados para la validación (puntos rojos) sobre imagen LiDAR aeroportado.

5.2. Validación de los MDTs

En las siguientes imágenes se muestran los modelos de sombras de los tres MDTs generados (Figuras 16, 17 y 18) . Todos ellos cuentan con una muy buena resolución siendo la del LiDAR aeroportado de 1 metro, la del LIDAR terrestre de 0,1 metros y la resolución de la fotogrametría aeroportada de 0,06 metros.

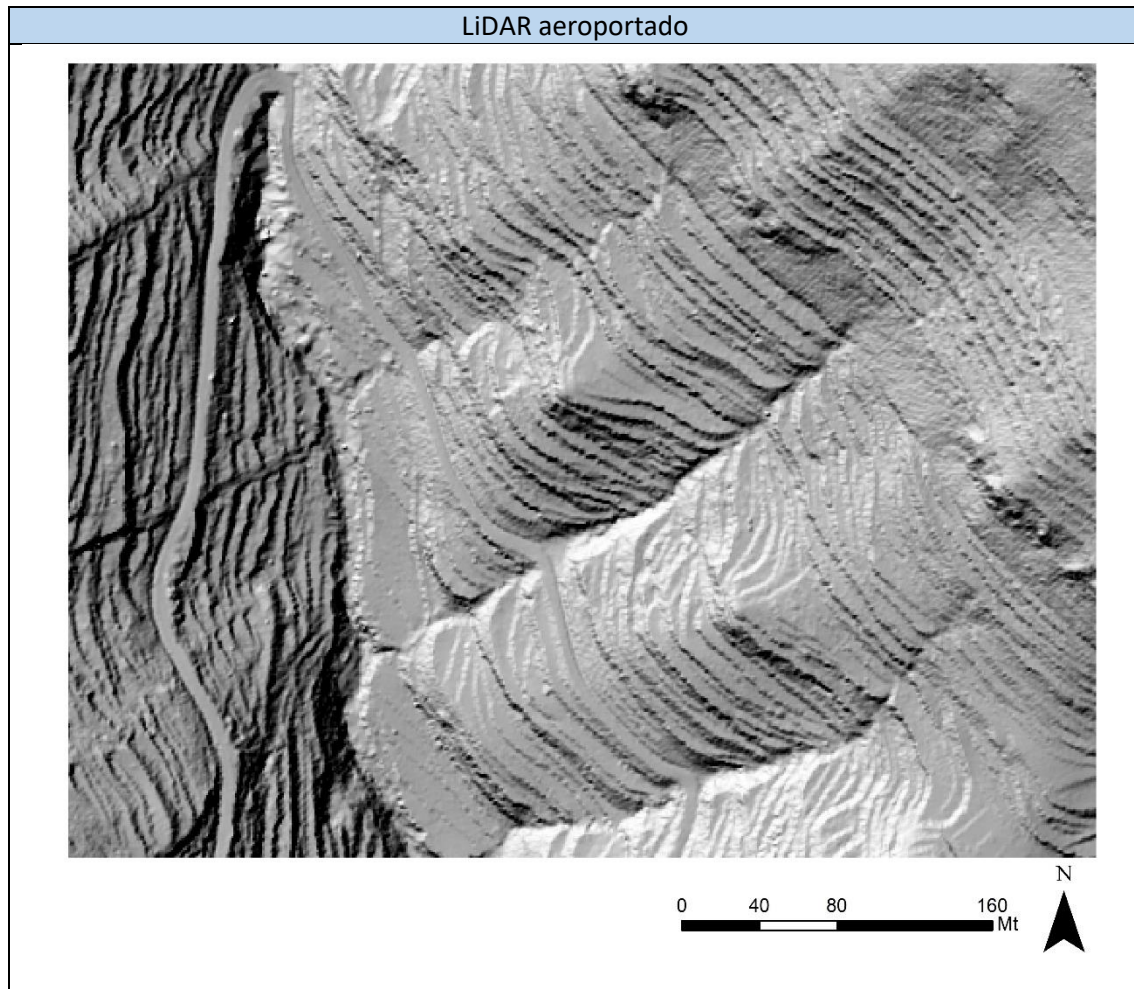


Figura 16: Vista de detalle del MDT generado con el LiDAR aeroportado.

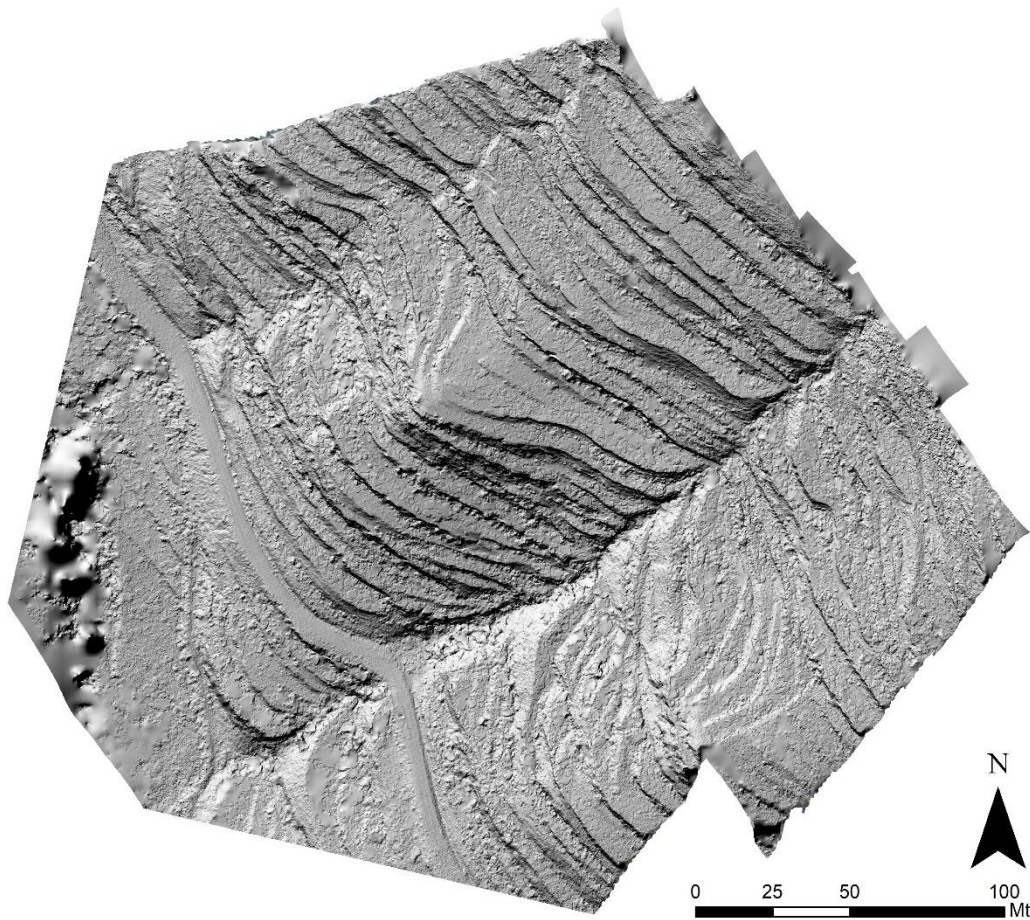


Figura 17: Vista de detalle del MDT generado con la fotogrametría aeroportada.

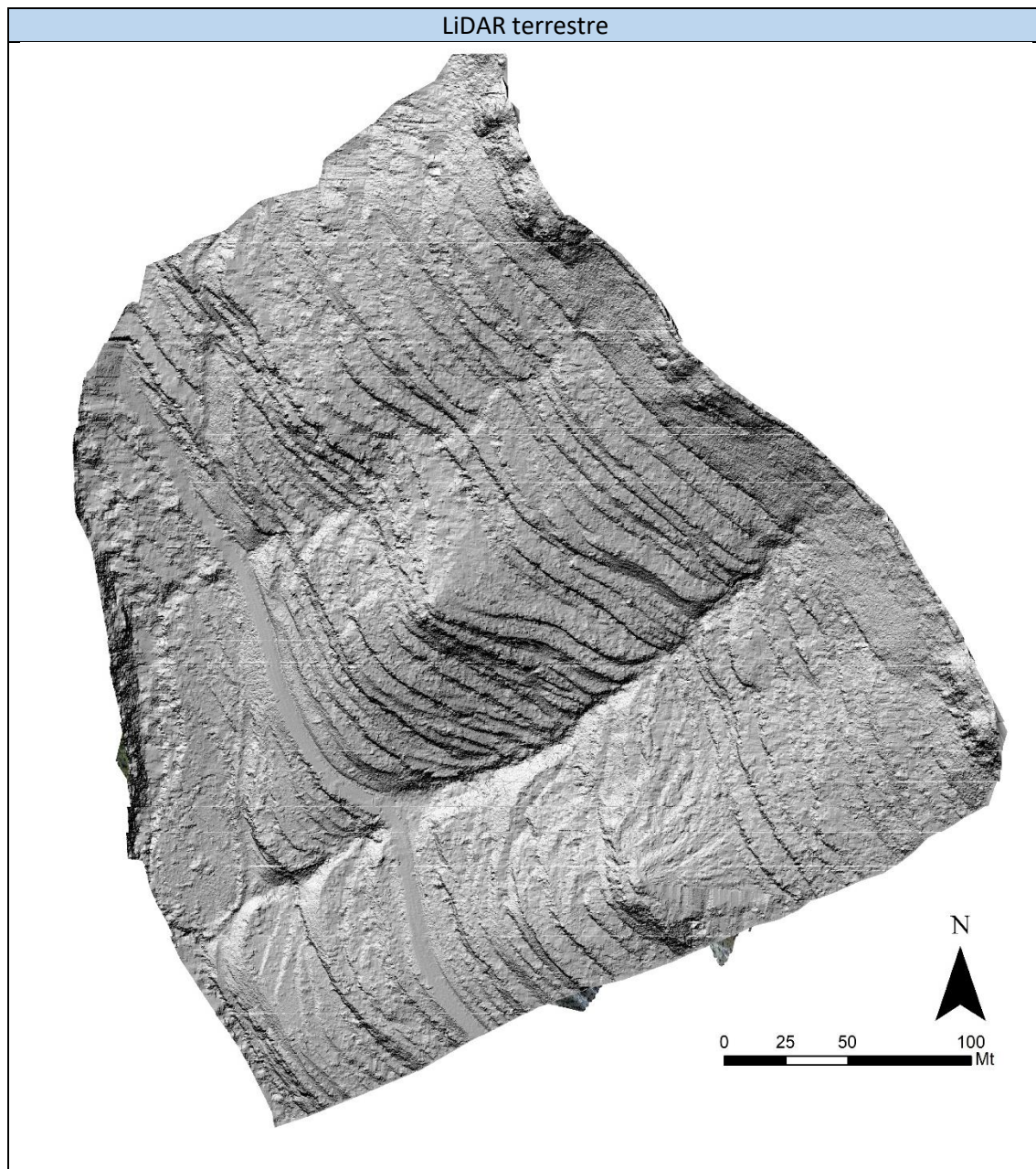


Figura 18: Vista de detalle del MDT generado con el LiDAR terrestre.

A pesar de contar con una muy buena resolución, los modelos pueden contener errores en su altitud, es por ello por lo que se realiza la validación. El proceso de validación de los modelos digitales de elevación se realiza una vez extraídos los datos al software Excel. En este caso se elaboran dos gráficos de dispersión que relacionan los puntos de suelo del LiDAR aeroportado del PNOA, considerados (a efecto de estos análisis) como verdad-terreno, con las medidas en la coordenada Z de los MDTs derivados del LiDAR terrestre y de la fotogrametría aeroportada. (Figuras 19 y 20).

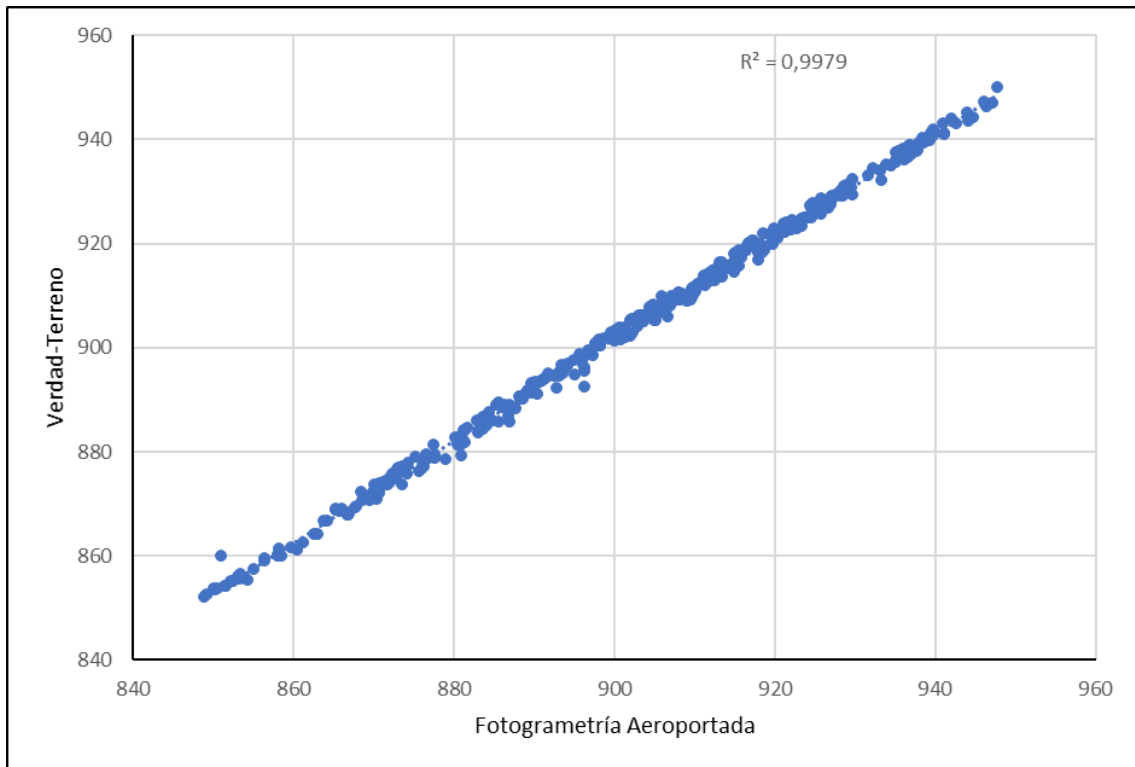


Figura 19: Correlación entre verdad -terreno (LiDAR PNOA) y la fotogrametría aeroportada.

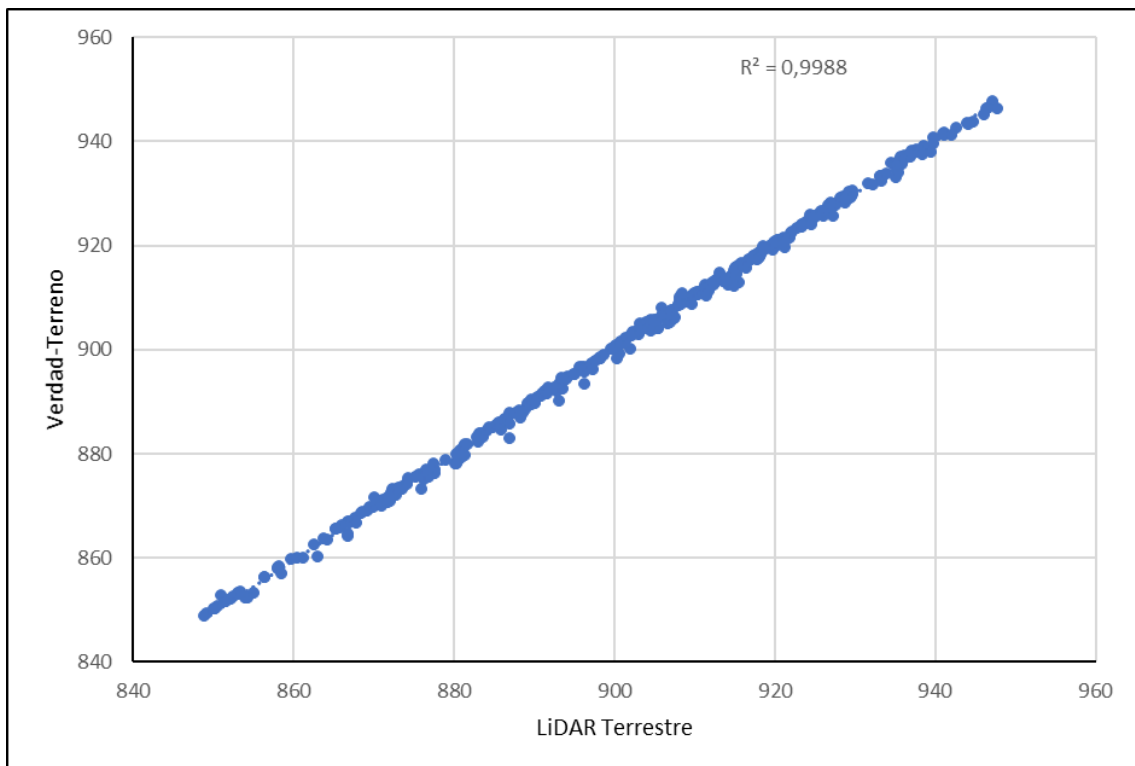


Figura 20: Correlación entre verdad -terreno (LiDAR PNOA) y el LiDAR terrestre.

Tanto la figura 19 como la 20, muestran que la correlación de ambos MDTs con la verdad-terreno es muy buena ($R^2=0.99$).

5.3. Derrumbes detectados por el método hidro-topográfico

Este método se basa en la hipótesis de que se pueden detectar los derrumbes en los muros de los bancales a partir la de intersección de los mismos con la red de drenaje (Ver apartado 4.5.1). Para ello se trabaja con dos derivadas de los MDTs, una que representa los muros (Figura 21) y otra que representa la red de drenaje (Figura 22).

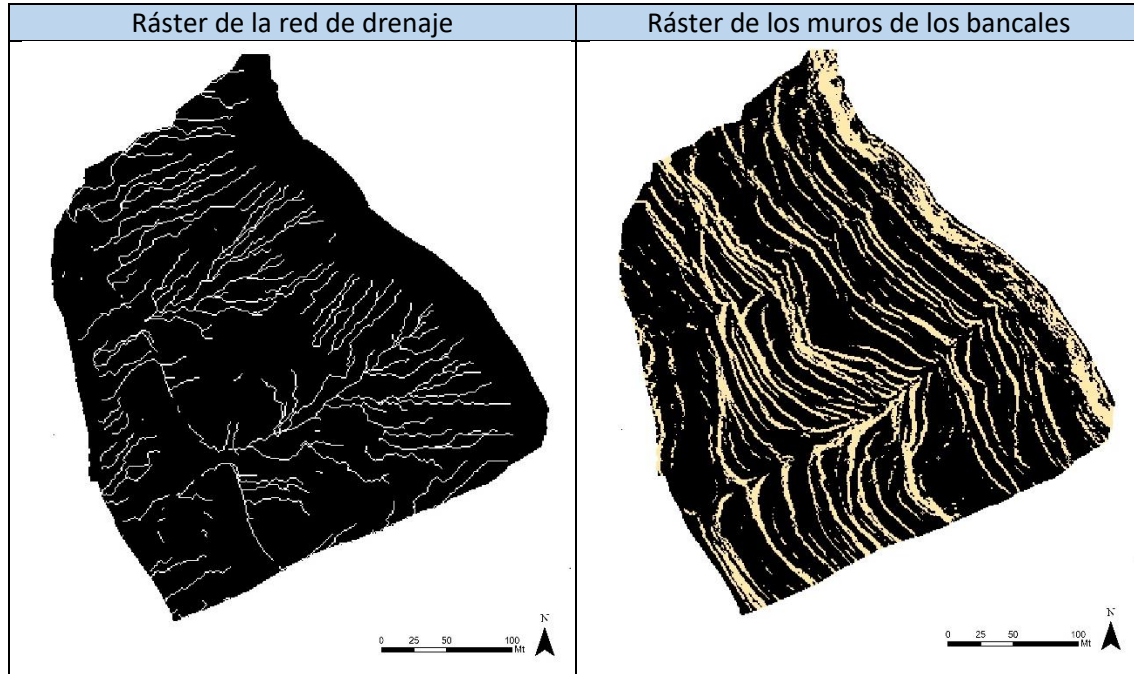


Figura 21: Ejemplo de la red de drenaje (izquierda) y de los muros de los bancales (derecha) derivados del MDT generado por LiDAR terrestre

De la intersección de ambas derivadas, se genera una capa que representa las zonas susceptibles de haber sufrido un derrumbe. A continuación, se muestran las diferentes capas obtenidas de la aplicación de este método. Son en total tres capas, una por cada MDT (Figuras 22, 23 y 24).

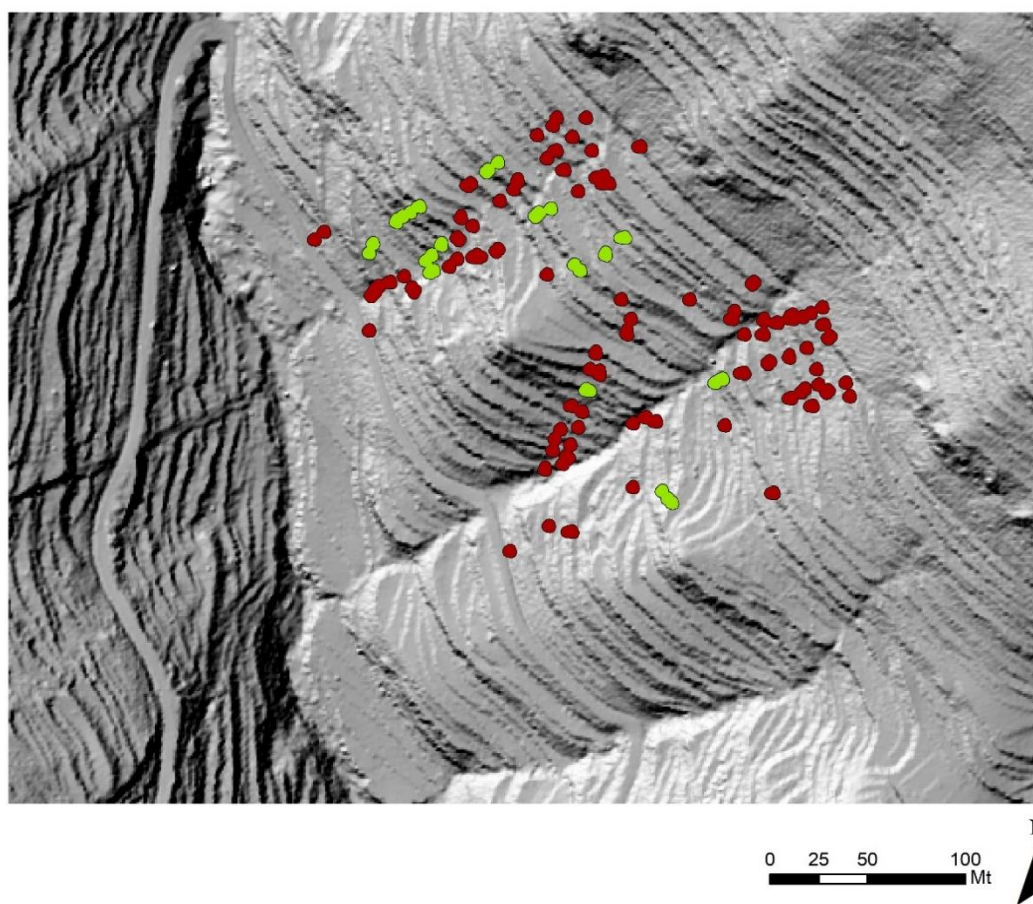


Figura 22: Zonas identificadas como derrumbes mediante el método hidro-topográfico aplicado al MDTs generado por LiDAR aeroportado. En verde los derrumbes detectados, en rojo los derrumbes sobreestimados.

Esta técnica de teledetección detecta zonas susceptibles de derrumbe sobre todo en la zona alta y norte de la ladera, sin detectar apenas ninguno en el centro de la ladera. Precisamente al norte es donde se localizan la mayoría de los aciertos. Con respecto a los derrumbes detectados, no se detecta ninguna tendencia. Además, si se comparan los derrumbes acertados con las características de esos mismos derrumbes tomadas en campo: dimensiones, concavidad y vegetación; no es posible establecer qué tipo de derrumbe se detecta más fácilmente.

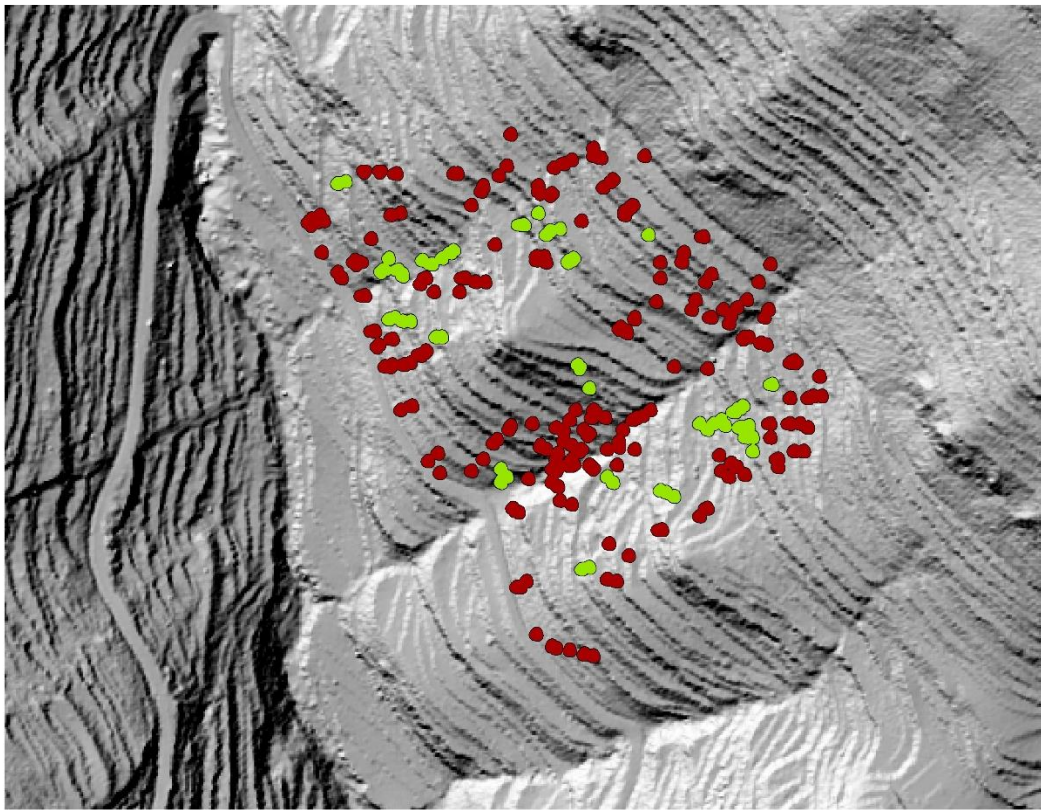


Figura 23: Zonas identificadas como derrumbes mediante el método hidro-topográfico aplicado al MDTs generado por la fotogrametría aeroportada. En verde los derrumbes detectados, en rojo los derrumbes sobreestimados.

Con la fotogrametría aeroportada se han detectado derrumbes por toda la ladera, excepto en la zona central. Los derrumbes acertados se distribuyen por toda la ladera, incluso en las zonas más bajas. Se observa una acumulación de derrumbes sobreestimados en el centro-sur de la ladera, seguramente debido a la formación de una subcuenca. Si se comparan los derrumbes acertados con las características de esos mismos derrumbes tomadas en campo: dimensiones, concavidad y vegetación; no es posible establecer qué tipo de derrumbe se detecta más fácilmente.

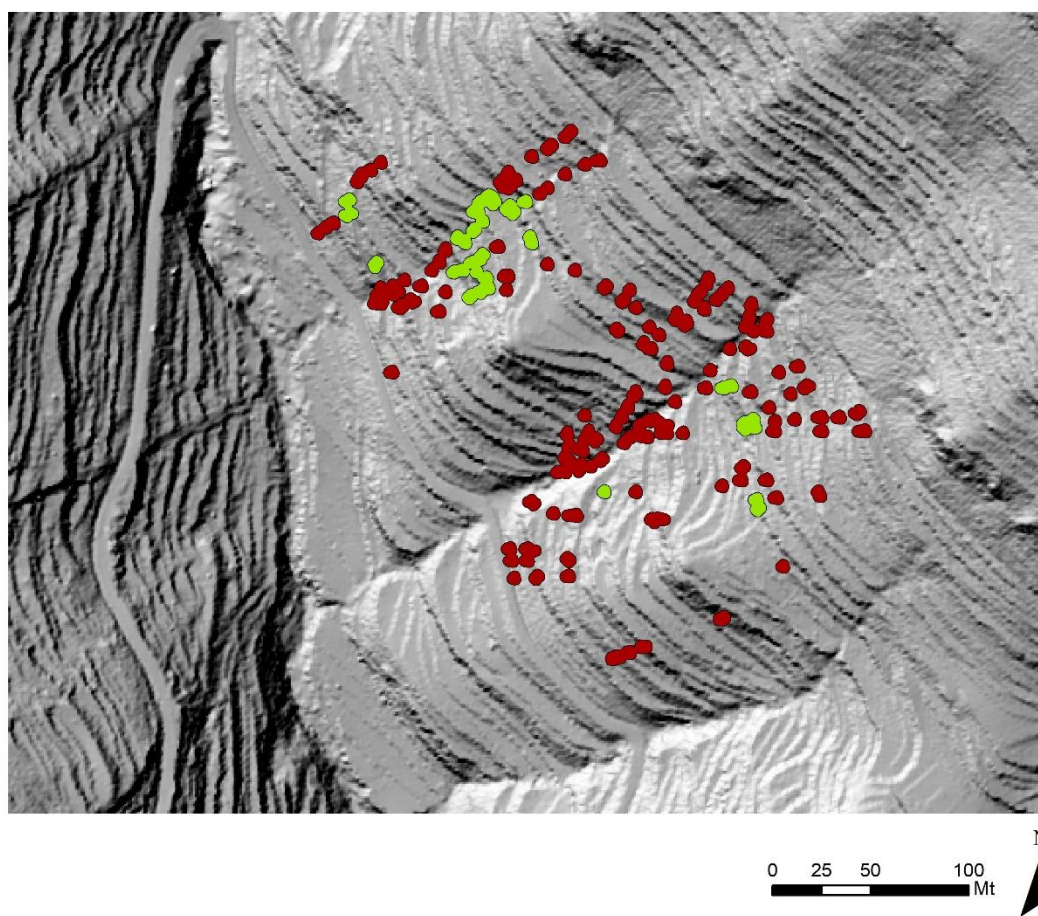


Figura 24: Zonas identificadas como derrumbes mediante el método hidro-topográfico aplicado al MDTs generado por LiDAR terrestre. En verde los derrumbes detectados, en rojo los derrumbes sobreestimados.

El LiDAR terrestre ha detectado derrumbes sobre todo en la zona alta, sur y norte, sin apenas detectar ninguno en las zonas baja y media de la ladera. Los derrumbes detectados se concentran sobre todo al norte, unos pocos en la zona alta y únicamente uno en el sur de la ladera. Se observa una acumulación de derrumbes sobreestimados, parecida a la encontrada en los resultados de la fotogrametría terrestre, en el centro-sur de la ladera. Si se comparan los derrumbes acertados con las características de esos mismos derrumbes tomadas en campo: dimensiones, concavidad y vegetación; no es posible establecer qué tipo de derrumbe se detecta más fácilmente.

La tabla a continuación (Tabla 8) muestra los resultados de la validación de este método con los 102 derrumbes inventariados.

Validación del método hidro-topográfico			
	Lidar Aeroportado	Fotogrametría	Lidar Terrestre
Número de derrumbes detectados	15	22	10
Número de derrumbes omitidos	87	80	92
Número de derrumbes sobreestimados	57	99	76
Porcentaje de acierto	14,7%	21,6%	9,8%

Tabla 8: Validación del método hidro-topográfico

Como se puede observar los resultados de este método no son especialmente buenos: los porcentajes de acierto son muy bajos (en torno al 21% en el mejor de los casos) y se detectan muchos derrumbes allí donde no los hay. Destaca como la mejor técnica a la hora de usar este método la fotogrametría aeroportada y como la peor, el LiDAR terrestre.

5.4. Derrumbes detectados por el método OBIA

Este método solamente se pudo aplicar sobre la fotogrametría aeroportada (ver apartado de discusión). La capa con las zonas identificadas como derrumbe se muestra a continuación (Figura 25).

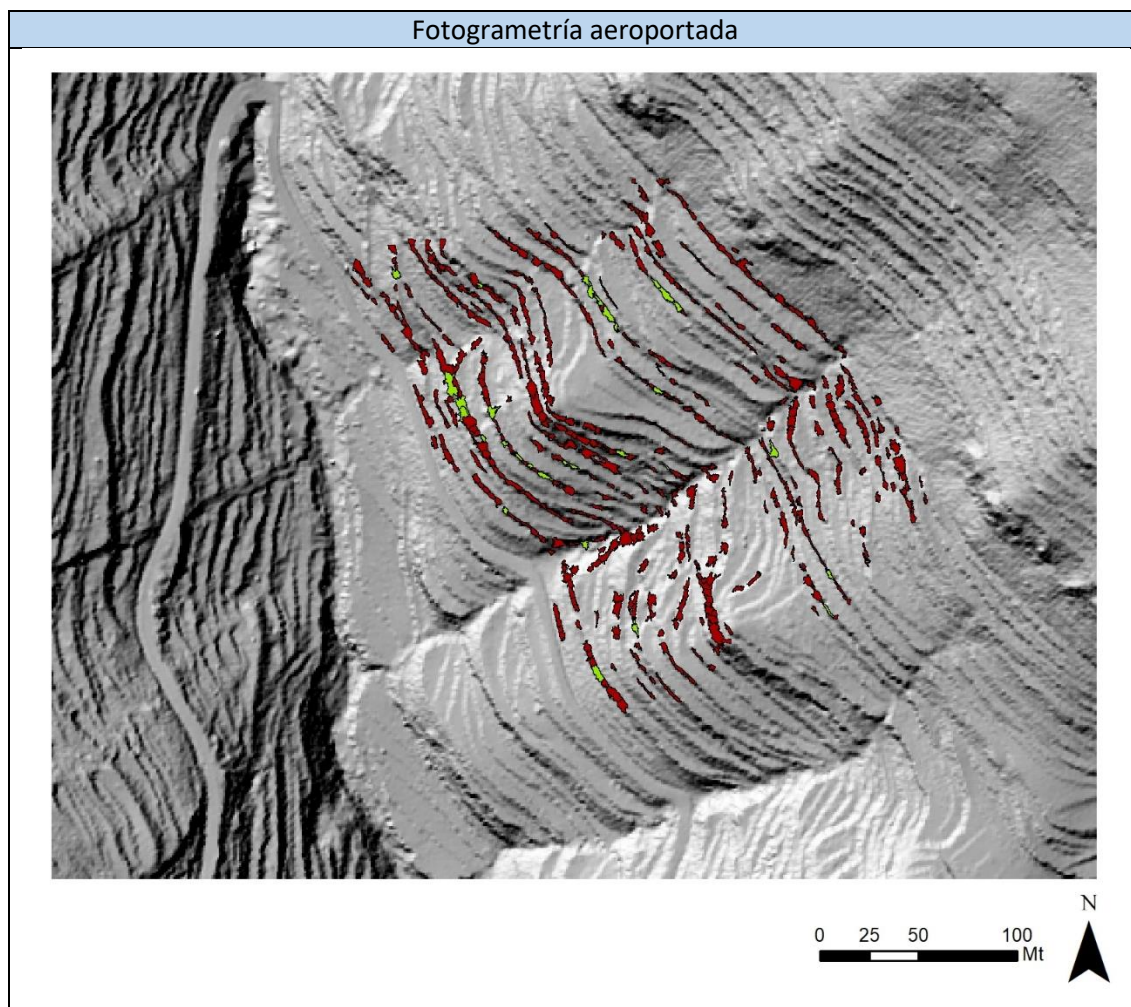


Figura 25: Zonas identificadas como derrumbes mediante el método OBIA y con el MDT generado por el LiDAR aeroportado de fondo. En verde los derrumbes detectados, en rojo los derrumbes sobreestimados.

La metodología OBIA aplicada sobre la fotogrametría aeroportada ha detectado gran cantidad de derrumbes distribuidos de forma uniforme por toda la ladera, incluida la zona central. Todos los derrumbes detectados sean aciertos o no, se ajustan perfectamente a la morfología de los muros de los bancales. Los derrumbes detectados también se distribuyen homogéneamente por la ladera destacando la zona norte. Si se comparan los derrumbes acertados con las características de esos mismos derrumbes tomadas en campo: dimensiones, concavidad y vegetación; no es posible establecer qué tipo de derrumbe se detecta más fácilmente (Tabla 10).

La tabla a continuación (Tabla 9) muestra los resultados de la validación de este método con los 102 derrumbes inventariados.

Validación del método OBIA	
	Fotogrametría
Derrumbes detectados	51
Derrumbes omitidos	51
Derrumbes sobreestimados	567
Porcentaje de acierto	50%

Tabla 9: Validación del método OBIA

Como se puede observar, el porcentaje de acierto ha mejorado con respecto a los resultados obtenidos en el método hidro-topográfico. En este caso se alcanza el 50% de acierto. A pesar de ello, el número de derrumbes sobreestimados también ha aumentado mucho identificando muchos derrumbes donde no los hay.

Hay que destacar que la resolución de la segmentación aplicada sobre los rásters derivados del MDT de la fotogrametría aeroportada (con un tamaño de píxel de 0.06 m) es muy alta. Como se puede observar a continuación (Figuras 26 y 27), el algoritmo de clasificación es capaz de delimitar, en muchos casos, los derrumbes a la perfección.



Figura 26: Vista de detalle de la segmentación de derrumbes. Izquierda: modelo de sombras del MDT. Centro: ortofotografía. Derecha: modelo de sombras y delimitación del derrumbe (rojo).



Figura 27: Vista de detalle de la segmentación de derrumbes. Izquierda: modelo de sombras del MDT. Centro: ortofotografía. Derecha: modelo de sombras y delimitación del derrumbe (rojo).

Estas dos secuencias de imágenes muestran de izquierda a derecha en primer lugar el modelo de sombras del MDT de la fotogrametría aeroportada, en segundo lugar, la ortofotografía y, en tercer lugar, cómo la segmentación (en rojo) ha sido capaz de delimitar perfectamente la cicatriz del derrumbe en dos zonas diferenciadas de la ladera.

Esa precisión a la hora de detectar los derrumbes ha permitido contrastar las dimensiones de los 12 derrumbes detectados por el método OBIA con las medidas tomadas sobre esos mismos derrumbes en el campo. La tabla a continuación (Tabla 10) muestra ambas medidas y su diferencia, además del resto de datos tomando de cada uno de esos derrumbes.

Altura del derrumbe medida en campo (m)	Concavidad SI / NO	Porcentaje de vegetación (%)	Longitud medida en campo (m)	Longitud medida sobre polígonos (m)	Desviación (m)
2,4	NO	NO	7,15	7,5	0,35
1,3	SI	30	3,2	3,45	0,25
1,8	SI	40%	3,2	4,8	1,6
1,9	SI	NO	2,8	3,3	0,5
1,3	SI	20%	5,2	5	0,2
2,5	NO	NO	5,4	5,3	0,1
1,4	SI	10%	2,6	3,12	0,52
2	NO	5%	2,8	2,08	0,72
1,15	SI	NO	2,1	3,8	1,7
1,7	NO	80%	5,1	5,3	0,2
2	SI	5%	3,9	4	0,1
2,2	NO	5%	6	4,3	1,7
Media			4,12	4,32	0,66

Tabla 10: Comparación de las medidas de la longitud de los derrumbes tomadas en campo con la longitud medida sobre los polígonos derivados de la segmentación.

Así se ha comprobado que el método detecta el tamaño de los derrumbes con una precisión de ± 0.6 m. En función del resto de características tomadas en campo sobre los derrumbes: altura,

concavidad y porcentaje de vegetación; no se observa ninguna relación entre ninguna de estas variables y la precisión de la segmentación a la hora de delimitar el derrumbe.

6. Discusión

A lo largo de este apartado de discusión se valoran los resultados obtenidos en cada una de las fases de este trabajo, haciendo hincapié en las dificultades técnicas, logísticas y metodológicas que se han encontrado a lo largo del proceso. También se evalúa la capacidad de cada técnica de obtención de los MDT y cada método para detectar derrumbes, describiendo sus debilidades y fortalezas.

6.1. Inventario de derrumbes y caracterización

La salida de campo proporcionó un inventario de derrumbes con el que poder extraer las características principales de los derrumbes presentes en la ladera y con el que poder validar los métodos de detección hidro-topográfico y OBIA.

Por otro parte, el proceso de toma de datos en campo resultó muy lento debido a las características de la ladera. Con la información disponible: altura del derrumbe, longitud del derrumbe, concavidad y porcentaje de vegetación; no se ha podido establecer un prototipo de derrumbe dominante en el área de estudio.

El único aspecto limitante para la realización de esta parte del trabajo fue no poder contar con un GPS diferencial que tomase coordenadas precisas en el eje Z, lo que hubiera permitido una validación más adecuada.

6.2. Obtención de datos (nubes de puntos) y fuentes de información

Al igual que a lo largo de la realización de los análisis, durante la obtención y preprocesado de los datos en bruto pueden surgir dificultades. La facilidad de acceso a la información y el nivel de clasificación de la nube de puntos son clave a la hora de realizar análisis y ahorran mucho tiempo.

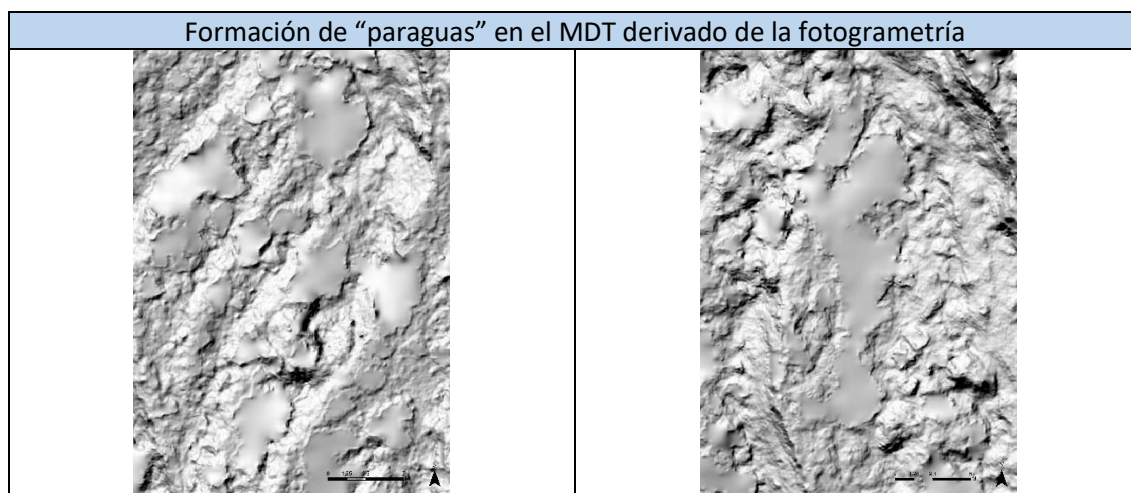
La nube de puntos del LiDAR aeroportado, obtenida del centro de descargas del CNIG (<https://centrodedescargas.cnig.es/>), es sin duda, el tipo de dato más accesible. Además, el tipo de producto es óptimo dado que proporcionan una nube de puntos ya clasificada. Asimismo, también incluyen información sobre los metadatos: sensor, tiempo de captura, RMSE, etc. Su resolución espacial métrica es su principal inconveniente a la hora de realizar unos análisis que en ocasiones requieren trabajar con tamaños de píxel submétricos.

Los datos obtenidos a partir del LiDAR terrestre y la fotogrametría requieren de dispositivos específicos (escáner terrestre, dron) y personal cualificado, por lo tanto, su disponibilidad es más limitada que el caso del PNOA. Además, para el caso de la fotogrametría aeroportada las configuraciones de alta calidad de Agisoft Photoscan han requerido de un equipo con 32Gb de memoria RAM permitiendo obtener una resolución de 0.06 metros de lado de píxel para el MDT.

Por otra parte, tanto en el caso del LiDAR terrestre como de la fotogrametría, fue necesaria una clasificación de la nube de puntos. Este proceso supone un trabajo adicional que no siempre resulta sencillo. Hasta que no se extrae el modelo digital de elevaciones y se valida para comprobar que las alturas en la coordenada Z son correctas, no se puede asegurar que la clasificación de la nube de puntos haya sido correcta. Este trabajo, además, ha contado con una dificultad añadida a la hora de clasificar la nube LiDAR: la vegetación. La presencia de matorrales muy densos y de poca altura supuso un problema para la extracción de los puntos de suelo con los que construir el MDT.

6.3. Obtención y validación de los MDTs

La obtención de los MDT una vez clasificadas las nubes de puntos LiDAR no supuso grandes dificultades. Hay que señalar, no obstante, que la capacidad de las imágenes obtenidas a partir de la técnica de fotogrametría aerotransportada para atravesar la vegetación es muy baja no permitiendo la obtención de puntos de suelo. Por lo tanto, la clasificación de la nube de puntos en las zonas cubiertas por matorrales no es adecuada, formándose, ante la falta de puntos para interpolar los valores z en esas zonas, lo que se han denominado “paraguas” (Figuras 28 y 29).



Figuras 28 y 29: Imágenes representativas del MDT de la fotogrametría

La formación de los paraguas puede llegar a afectar de dos formas en nuestros análisis. Por un lado, en ambos métodos, impidiendo la detección del derrumbe si este se encuentra vegetado y sobre él se ha generado un “paraguas”. Por otro lado, estas distorsiones pueden originar rupturas en la red de drenaje y por lo tanto subcuentas en la capa de acumulación de flujo afectando al método hidro-topográfico.

Si se observa la capa resultante de este método al aplicarse sobre la fotogrametría (Figura 23), se observa una aglomeración de derrumbes sobreestimados en la zona centro-sur de la ladera con forma más o menos circular, seguramente originado por a la formación de una subcuenca.

No obstante, y a pesar de esta limitación, los MDTs generados a partir de ambas fuentes de información (LiDAR terrestre y fotogrametría aerotransportada) pueden considerarse que muestran un buen ajuste, tal y como se mostraba en sus gráficos de dispersión (Figuras 19 y 20).

6.4. Detección de derrumbes: método hidro-topográfico

Este método de detección de derrumbes se basa en la idea de que un derrumbe en un muro de un bancal crea una concavidad que puede detectarse a partir de la red de drenaje generada con un MDT de alta resolución. Esta aproximación se basa en el trabajo de (Pijl et al., 2021) en el que los autores aplican un modelo de erosión por escorrentía superficial en una ladera abancalada y encuentran una buena correspondencia entre los flujos preferenciales (*preferential pathways*) generados por el modelo y la localización del bancal degradado.

Hay que señalar que para el caso de los MDTs generados por el LiDAR terrestre y la fotogrametría, con una resolución espacial de mucho detalle y, por lo tanto, una topografía muy rugosa, se creaban innumerables flujos y subcuencas. Por ello se optó por cambiar la resolución de las capas y tras varias pruebas a diferentes resoluciones y juzgar los resultados, se decidió trabajar con una resolución de 1 metro.

Por otra parte, a la hora de detectar los muros hubo que probar diferentes herramientas hasta seleccionar aquellas con los mejores resultados. Se probaron y compararon tres herramientas: “Edge Detection”, “Sobel Filter” y “Sky View Factor”. Finalmente se decidió utilizar esta última tras una comparativa visual.

Los resultados de la aplicación de este método para la detección de derrumbes en muros no han sido buenos, con unos porcentajes de acierto muy bajos, siendo la fotogrametría la que mejores resultados ha ofrecido, con un 21% de derrumbes detectados (Tabla 8). Además, este método sobreestima de manera considerable el número de derrumbes, con 4,5 veces más falsos derrumbes detectados para el caso de la fotogrametría y hasta 7 veces más falsos derrumbes detectados para el caso del LiDAR terrestre.

Los derrumbes detectados por cada una de las técnicas de teledetección varían considerablemente, localizándose en diferentes zonas de la ladera no pudiendo identificar ningún patrón. Si se comparan los derrumbes detectados mediante este método, con la información recogida en el inventario de derrumbes realizado, no se puede determinar si alguna de las características recogidas facilita la detección.

En el inventario solo contamos con 23 derrumbes, aunque este número no influye significativamente en los resultados del trabajo. Conseguir un inventario con un mayor número de derrumbes podría permitir identificar patrones de acierto y error en la ladera para cada uno de los métodos y determinar qué tipo de derrumbe se detecta mejor en función de sus características: vegetados, no vegetados, cóncavos... etc.

6.5. Detección de derrumbes: método OBIA

Esta metodología se basa en la segmentación a partir de las derivadas del MDT y en la aplicación posterior de un algoritmo de clasificación basado en procesos dirigidos de entrenamiento. Se decidió aplicar este método, a partir de la revisión de los trabajos de (Van den Eeckhaut et al., 2012) y (Pawłuszek et al., 2019) en los que se utilizaba para la detección de deslizamientos de decenas de metros utilizando el software de pago Ecognition (desarrollado por Trimble Geoespatial). Sin embargo, en este TFM se decidió utilizar el plugin “Orfeo Tool Box” (OTB) en QGIS, que ofrece resultados equivalentes en el estudio de (Lourenço et al., 2021) y es de libre acceso.

El algoritmo de segmentación de “Orfeo Tool Box” presentaba una limitación con respecto al software Ecognition: este último permite ponderar y variar los pesos que tienen las derivadas del MDT del multibanda (*Layer Stack*) a la hora de segmentar. En el algoritmo “*Large Scale Mean Shift*” de OTB, todas las derivadas pesan igual. En este sentido (Pawłuszek et al., 2019a) utiliza hasta 8 derivadas ponderadas mientras que en nuestro caso sólo pudieron incluirse 3 sin introducir ruido.

Este método, y en concreto el algoritmo de segmentación “*Large Scale Mean Shift*”, requiere una gran dedicación en el ajuste de los parámetros en relación con la identificación de las variables derivadas del MDT y con el radio de búsqueda de la kernel y el tamaño de segmento mínimo.

Por otra parte, no fue posible aplicarlo ni al LiDAR aeroportado, ni al LiDAR terrestre. En el caso de los datos del PNOA el problema fue la resolución métrica obtenida en el MDT, que impidió aplicar una segmentación lo suficientemente precisa como para que detectase en un único polígono un derrumbe aislado. En el segundo caso, la nube de puntos tenía un leve defecto, que provocaba un ligero bandeo horizontal en el MDT.

En general el método OBIA, aunque es el mejor en cuanto a porcentaje de acierto se refiere, sobreestima mucho el número de derrumbes. Es importante señalar que la sobreestimación se vería reducida si todos los derrumbes del área de estudio se encontrasen localizados en la capa de validación.

En cuanto a los derrumbes detectados, estos se distribuyen por toda la ladera y no se observa ningún patrón. Si se comparan los derrumbes detectados mediante este método, con la información recogida en el inventario de derrumbes realizado, no se puede determinar si alguna de las características recogidas facilita la detección.

Por último, señalar su precisión a la hora de delimitar polígonos ha permitido comparar las longitudes de los derrumbes tomadas en campo con las obtenidas por este resultado. Los resultados han sido muy buenos con una desviación de 0,6 metros para los 12 derrumbes detectados.

7. Conclusiones

Este trabajo ha supuesto la obtención de nubes de puntos (coordenadas x, y, z) a partir de tres fuentes de datos distintas: LiDAR aeroportado, LiDAR terrestre y fotogrametría aeroportada. Asimismo, se han utilizado dos métodos de análisis, hidro-topográfico y OBIA, para la detección de derrumbes en bancales abandonados.

Los resultados obtenidos con el método hidro-topográfico no son muy prometedores, los porcentajes de acierto son muy bajos y el número de derrumbes sobreestimados muy alto para las tres técnicas de teledetección, siendo la mejor la fotogrametría aeroportada. Este método es una reinterpretación de la metodología aplicada por (Pijl et al., 2021). Si bien es cierto que en el trabajo anteriormente mencionado los resultados son positivos, solo aplica esta metodología a un único bancal (0,5 ha), mientras que este trabajo a una ladera (6,45 ha).

Los resultados del segundo enfoque OBIA tampoco han sido los esperados, aparte de que solamente se ha podido aplicar sobre la fotogrametría aeroportada, el porcentaje de acierto ha sido del 50% y la sobreestimación muy por encima de lo deseado. Se considera que los resultados se pueden mejorar y afinar con un mayor tiempo de entrenamiento del algoritmo de clasificación. Basándonos en los estudios de (Van den Eeckhaut et al., 2012) y (Pawłuszek et al., 2019), se podría modificar el multibanda con nuevos parámetros como medidas texturales o color (RGB mediante ortofotografía). Aunque estos estudios aplicaron esta metodología a *landslides* de cientos de metros mientras que aquí se aplican sobre derrumbes métricos lo que eleva la dificultad del trabajo y su grado de experimentalidad.

Las tres fuentes de datos han producido un modelo digital de elevaciones más que satisfactorio con el que trabajar. En varios trabajos se ha observado el uso de la fotogrametría (SfM) para el estudio de la erosión y los deslizamientos con resultados muy positivos (Gómez-Gutiérrez et al., 2014; Nadal-Romero et al., 2015b; Xu et al., 2020). Si bien ninguno trabajaba con zonas con una vegetación tan extendida como en este caso, que originaron la formación de *paraguas* en el MDT. A pesar de ello, presentaba una resolución de 0,6 metros.

Se reconoce la facilidad de acceso y alto nivel de depuración del LiDAR aeroportado de descarga pública del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica). Que se recomienda en caso de no tener que trabajar a escala submétrica. En caso de tener que reducir la escala de trabajo por debajo de la unidad, se recomienda trabajar con el LiDAR terrestre en caso de existir vegetación en el área de estudio, y con la fotogrametría aeroportada en dron en caso de no existir vegetación.

Si se analizan la localización de los derrumbes detectados por cada una de las metodologías, no se puede establecer un patrón espacial. Y comparando estos mismos derrumbes con los datos recogidos en el inventario, tampoco se puede identificar una relación entre las variables: longitud del derrumbe, altura del muro, concavidad y porcentaje de vegetación con la capacidad de detección.

De cara a futuros trabajos sería interesante comprobar en el campo qué características tenían las zonas detectadas como derrumbes sobreestimados y tratar de ajustar el entrenamiento del algoritmo de clasificación. Además, conseguir un inventario con un mayor número de derrumbes podría permitir identificar patrones de acierto y error en la ladera para cada uno de los métodos y determinar qué tipo de derrumbe se detecta mejor en función de sus características.

8. Agradecimientos

Gracias a Maria Paz Errea Abad e Ignacio López-Moreno, pertenecientes al Instituto Pirenaico de Ecología (IPE) por prestarnos y volar el dron usado en este trabajo.

9. Bibliografía y fuentes

Calsamiglia, A. *et al.* (2018) "Spatial patterns of sediment connectivity in terraced lands: Anthropogenic controls of catchment sensitivity," *Land Degradation and Development*, 29(4), pp. 1198–1210. doi:10.1002/ldr.2840.

Cucchiaro, S. *et al.* (2020a) "Multiplatform-SfM and TLS data fusion for monitoring agricultural terraces in complex topographic and landcover conditions," *Remote Sensing*, 12(12). doi:10.3390/rs12121946.

Cucchiaro, S. *et al.* (2020b) "Multiplatform-SfM and TLS data fusion for monitoring agricultural terraces in complex topographic and landcover conditions," *Remote Sensing*, 12(12). doi:10.3390/rs12121946.

Ortigosa L. *et al.* (2015) "Caracterización Ambiental Y Procesos Geomorfológicos En bancales agrícolas abandonados en Munilla (Sistema Ibérico, La Rioja)" pp. 297-310. Doi: 4854130.

Van den Eeckhaut, M. *et al.* (2012) "Object-oriented identification of forested landslides with derivatives of single pulse LiDAR data," *Geomorphology*, 173–174, pp. 30–42. doi:10.1016/j.geomorph.2012.05.024.

Ferrer, V. *et al.* (2017) "Análisis multiescala para estudiar procesos geomorfológicos en un área acarcavada de ambientes semiáridos (depresión del Ebro, España)," *Cuadernos de Investigacion Geografica*, 43(1), pp. 41–62. doi:10.18172/cig.3139.

García-Ruiz, J.M. and Lana-Renault, N. (2011) "Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region - A review," *Agriculture, Ecosystems and Environment*, pp. 317–338. doi:10.1016/j.agee.2011.01.003.

Gómez-Gutiérrez, Á. *et al.* (2014) "Using 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion," *Catena*, 120, pp. 91–101. doi:10.1016/j.catena.2014.04.004.

J. Arnaez *et al.* (2009) "Gestión del Territorio y erosión de suelos en Cameros (Sistema Ibérico, La Rioja)", pp. 145–164. (Libro)

Lana-Renault, N. *et al.* (2014) *RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA DE BANCALES ABANDONADOS (CAMERO VIEJO, LA RIOJA)*.

Lasanta Martínez, T. *et al.* (2013) "Los bancales en las montañas españolas: un paisaje abandonado y un recurso potencial," *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (63), pp. 301–322. doi:10.21138/bage.1616.

Lasanta, T. *et al.* (2013) "Los bancales en las montañas españolas: un paisaje abandonado y un recurso potencial"

BAGE N.º 63 - 2013, pp. 301-322 I.S.S.N.: 0212-9426B

Li, X. *et al.* (2015) "Identification of forested landslides using lidar data, object-based image analysis, and machine learning algorithms," *Remote Sensing*, 7(8), pp. 9705–9726.

doi:10.3390/rs70809705.

Lourenço, P. *et al.* (2021) "Assessing the performance of different OBIA software approaches for mapping invasive alien plants along roads with remote sensing data," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jag.2020.102263.

Lourenço, P. *et al.* (2021) "NC-ND license Assessing the performance of different OBIA software approaches for mapping invasive alien plants along roads with remote sensing data,"

International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 95, p. 102263.

doi:10.1016/j.jag.2020.102263.

Meinel, G. and Neubert, M. (2004) "A Comparison of Segmentation Programs for High Resolution Remote Sensing Data," *XXth ISPRS Congress Technical Commission IV*, (January), p.

6.

Mora, O.E. *et al.* (2018) "Landslide change detection based on Multi-Temporal airborne LIDAR-derived DEMs," *Geosciences (Switzerland)*, 8(1). doi:10.3390/geosciences8010023.

Moreno-de-las-Heras, M. *et al.* (2019) "Hydro-geomorphological consequences of the abandonment of agricultural terraces in the Mediterranean region: Key controlling factors and landscape stability patterns," *Geomorphology*. Elsevier B.V., pp. 73–91.

doi:10.1016/j.geomorph.2019.02.014.

Nadal-Romero, E. *et al.* (2015a) "The application of terrestrial laser scanner and SfM photogrammetry in measuring erosion and deposition processes in two opposite slopes in a humid badlands area (central Spanish pyrenees)," *SOIL*, 1(2), pp. 561–573. doi:10.5194/soil-1-561-2015.

Nadal-Romero, E. *et al.* (2015b) "The application of terrestrial laser scanner and SfM photogrammetry in measuring erosion and deposition processes in two opposite slopes in a humid badlands area (central Spanish pyrenees)," *Soil*, 1(2), pp. 561–573. doi:10.5194/soil-1-561-2015.

Oke, T.R. *et al.* (1982) "The energetic basis of the urban heat island" Vol.108, N°455 Quart. J. R. met. Soc. pp. 1-24, Doi:10.1002/qj.49710845502

Pawłuszek, K. *et al.* (2019a) "Multi-aspect analysis of object-oriented landslide detection based on an extended set of LiDAR-derived terrain features," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(8). doi:10.3390/ijgi8080321.

- Pawłuszek, K. *et al.* (2019b) "Multi-aspect analysis of object-oriented landslide detection based on an extended set of LiDAR-derived terrain features," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(8). doi:10.3390/ijgi8080321.
- Pijl, A. *et al.* (2020) "TERRA: Terrain Extraction from elevation Rasters through Repetitive Anisotropic filtering," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84(September 2019), p. 101977. doi:10.1016/j.jag.2019.101977.
- Pijl, A. *et al.* (2021a) "Remote sensing vs. field-based monitoring of agricultural terrace degradation," *International Soil and Water Conservation Research*, 9(1), pp. 1–10. doi:10.1016/j.iswcr.2020.09.001.
- Pijl, A. *et al.* (2021b) "Remote sensing vs. field-based monitoring of agricultural terrace degradation," *International Soil and Water Conservation Research*, 9(1), pp. 1–10. doi:10.1016/j.iswcr.2020.09.001.
- Preti, F. *et al.* (2018) "Conceptualization of Water Flow Pathways in Agricultural Terraced Landscapes," *Land Degradation and Development*, 29(3), pp. 651–662. doi:10.1002/ldr.2764.
- Smith, M.W. and Vericat, D. (2015) "From experimental plots to experimental landscapes: Topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry," *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12), pp. 1656–1671. doi:10.1002/esp.3747.
- Tarolli, P., Preti, F. and Romano, N. (2014a) "Terraced landscapes: From an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment," *Anthropocene*, 6(October 2018), pp. 10–25. doi:10.1016/j.ancene.2014.03.002.
- Tarolli, P., Preti, F. and Romano, N. (2014b) "Terraced landscapes: From an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment," *Anthropocene*. Elsevier Ltd, pp. 10–25. doi:10.1016/j.ancene.2014.03.002.
- Tomás, R., Riquelme, A. and Cano, M. (2016) *Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos Multi-scale Observation and Monitoring of railway Infrastructure Threats (MOMIT) View project*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/309611177>.
- Xu, Q. *et al.* (2020) "Multitemporal UAV-based photogrammetry for landslide detection and monitoring in a large area: a case study in the Heifangtai terrace in the Loess Plateau of China," *Journal of Mountain Science*, 17(8), pp. 1826–1839. doi:10.1007/s11629-020-6064-9.
- Zhang, W. *et al.* (2016) "An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation," *Remote Sensing*, 8(6). doi:10.3390/rs8060501.